



HAL
open science

Analyse des mouvements transitoires dans les séries temporelles du RENAG : signal environnemental ou méthodologique ?

Cyril Teyssède

► **To cite this version:**

Cyril Teyssède. Analyse des mouvements transitoires dans les séries temporelles du RENAG : signal environnemental ou méthodologique ?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-02959740

HAL Id: dumas-02959740

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959740v1>

Submitted on 7 Oct 2020

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

Cyril TEYSSÉDRE

Analyse des mouvements transitoires dans les séries temporelles du RENAG :
signal environnemental ou méthodologique ?

Soutenu le 04 septembre 2019

JURY

Madame Élisabeth BOTREL	Président du jury
Madame Andréa WALPERSDORF	Maître de stage
Monsieur Laurent MOREL	Enseignant référent

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé pendant le stage et lors de la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je souhaite remercier mon encadrant de stage Mme Andréa WALPERSDORF qui a conduit ce travail de recherche au sein du laboratoire d'ISTerre, pour son aide quotidienne ainsi que son accompagnement lors de la relecture et de la correction de ce mémoire. Je remercie aussi M. Basile HECTOR de l'IGE pour ses idées lors de la phase de recherche ainsi que pour ses conseils en matière de programmation.

Je remercie également, M. Laurent MOREL mon professeur référent de l'ESGT ainsi que Mme Joëlle NICOLAS-DUROY pour leurs réponses, avis et commentaires sur mon mémoire lors des différents points d'avancements.

Pour toutes les données que j'ai reçues, je remercie M. Jean Paul BOY, de l'EOST qui m'a transféré les modèles de surcharge hydrologique et qui a répondu à mes questions, Mme Fatima KARBOU de Météo-France/CNRS qui m'a extrait des données météorologiques et Mme Christine MASSON qui m'a transmis les données issues de la solution SCRS.

Enfin, je remercie également ma famille et mes amis pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Liste des abréviations

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CF : Center of Figure

CM : Center of Mass

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EOST : École et Observatoire des Sciences de la Terre

EPOS : European Plate Observing System

FES 2004 : Finite Element Solution 2004

GAMIT : Global positioning system At Massachusetts Institute of Technology

GIPSY/OASIS : GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation
Software

GLDAS : Global Land Data Assimilation System

GLIMS : Global Land Ice Measurements from Space

GNSS : Global Navigation Satellite System

IERS 2010 : International Earth Rotation and Reference Systems Service

IGN : Institut Géographique National

INGV : Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

ISterre : Institut des Sciences de la Terre

ITRF : International Terrestrial Reference Frame

JPL : Jet Propulsion Laboratory

MERRA : Modern-Era Retrospective analysis for Research

PPP : Precise Point Positioning

RENAG : REseau NATional GNSS

RINEX : Receiver Independent Exchange Format

SCRS : Système Canadien de Référence Spatial

SRIF : Square Root Information Filter

VMF1 : Vienna Mapping Functions 1

Table des matières

Introduction	6
I LES MOUVEMENTS TRANSITOIRES	8
II LES DEFORMATIONS DE LA TERRE	9
II.1 LA REPONSE ELASTIQUE DE LA TERRE A LA SURCHARGE HYDROLOGIQUE	10
II.2 LA THEORIE DE LA POROELASTICITE.....	11
II.3 LA CIRCULATION DES FLUIDES EN PROFONDEUR	12
III DONNEES GPS	12
III.1 LES DIFFERENTES METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES.....	12
III.1.1 Méthode de la double différence	12
III.1.2 Méthode PPP.....	12
III.2 PRESENTATION DES DIFFERENTS LOGICIELS/OUTILS UTILISES ET DES SOLUTIONS	14
III.2.1 Logiciel GAMIT (Herring et al.,2010).....	14
III.2.2 Logiciel GIPSY/OASIS (ZUMBERGE et al, 1997)	14
III.2.3 Outil PPP-SCRS.....	15
III.2.4 Présentation des solutions	15
III.2.5 Paramètres et modèle des solutions.....	16
III.3 REALISATION D'UN PROCEDE DE TRAITEMENT ET ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES	18
III.3.1 Descriptions des séries temporelles.....	18
III.3.2 Méthode de détermination des vitesses et accélérations	19
III.3.3 Détermination des vitesses et accélérations des stations du RENAG	20
III.3.3.1 Test 1.....	20
III.3.3.2 Test 2.....	22
III.3.3.3 Test 3.....	24
III.3.4 Comparaison détaillée des solutions	26
III.3.4.1 Corrélation entre les solutions	26
III.3.4.2 Comparaison des mouvements en accélération des différentes solutions.....	29
IV RESULTATS.....	31
IV.1 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SIGNAUX ANNUELS PAR COMPARAISON AVEC LES MODELES DE SURCHARGE	31
IV.1.1 Présentation et caractérisation des signaux annuels	31
IV.1.2 Comparaison avec les modèles de surcharge	32
IV.2 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SIGNAUX LONG TERME (FORME, AMPLITUDE, REPARTITION SPATIALE)	36
IV.2.1 Identification et caractérisation des signaux long terme	36
IV.2.2 Comparaison avec les modèles de surcharge	37
IV.3 IDENTIFICATION DE PHENOMENES LOCAUX	38
IV.3.1 Présentation des données.....	38
IV.3.1.1 Données hydrographiques	38
IV.3.1.2 Données géologiques.....	38
IV.3.1.3 Données piézométriques.....	38
IV.3.1.4 Relief.....	39
IV.3.1.5 Données météorologiques	39
IV.3.1.6 Données GLIMS	40
IV.3.1.7 Failles	40
IV.3.2 Interprétation des résultats	41
IV.3.2.1 Hypothèse 1 : influence de la géologie locale	44
IV.3.2.2 Hypothèse 2 : influence des températures	46
IV.3.2.3 Hypothèse 3 : Influence des surfaces d'eau/cours d'eau	47

IV.3.2.4	Hypothèse 4 : Influence des failles proches	49
IV.3.2.5	Hypothèse 5 : Influence du relief	51
IV.3.2.6	Hypothèse 6 : Influence de la répartition spatiale des glaciers et des régions de lac glaciaires	52
IV.3.2.7	Hypothèse 7 : Influence des données piézométriques	53
IV.3.2.8	Hypothèse 8 : Influence des précipitations	54
Conclusion		56
Bibliographie		57
Liste des figures		58
Liste des tableaux		60
Table des annexes		60

Introduction

Au cours des 20 dernières années, l'évolution de la géodésie spatiale a permis d'obtenir des positionnements par satellites avec des précisions pouvant aller de plusieurs mètres à quelques millimètres en fonction de la méthode et du matériel utilisé. Ces données (pour les plus précises) peuvent permettre de réaliser un suivi et d'étudier les déformations de la croûte terrestre.

Parmi ces déformations, on trouve celles qui sont stables dans le temps et liées à la tectonique active qui agit sur le long terme, et celles qui sont variables dans le temps, provenant des phénomènes de surcharge. Les effets de surcharge créent une déformation temporaire de la croûte terrestre avec un impact plus important pour les déformations verticales qu'horizontales. Il en existe deux types, les surcharges maréales et les surcharges non-maréales. Les déformations de la croûte terrestre engendrées par les surcharges maréales sont bien connues et corrigées avec des modèles. Les déformations résultant de ces surcharges sont créées par des redistributions des masses (variation des masses océaniques, atmosphériques ...) découlant des attractions combinées de la Lune et du Soleil sur la Terre (phénomène de marée).

On s'intéresse ici plus particulièrement aux déformations engendrées par les surcharges non-maréales (principalement les surcharges en lien avec l'hydrologie).

L'objectif sera d'examiner les déformations de la croûte terrestre à partir des déplacements des stations du RENAG (70 stations réparties en France) sur une longue période d'acquisitions (10 à 20 ans de mesure) et de les comparer avec les déformations engendrées par les surcharges non-maréales.

Différentes solutions de traitement des données seront comparées pour les stations du RENAG (solution GAMIT, solution SCRS, solution EPOS (CNRS-ISTerre) et solution EPOS (INGV)) pour montrer que le signal obtenu est bien d'origine environnementale et non méthodologique. Dans cette comparaison des séries temporelles de positionnement pour chaque solution et pour chaque station on identifiera les déplacements/signaux transitoires. Il existe deux types de signaux, ceux liés aux phénomènes de surcharge saisonnière (périodique avec un cycle annuel) et ceux qui apparaissent sur une période d'observation plus longue (ce sont ces signaux aperiodiques dont on cherchera à déterminer l'origine). La comparaison permettra d'identifier les signaux transitoires persistants entre les quatre solutions sur le long terme et ainsi de montrer qu'ils ne

proviennent pas de la méthode de traitement. On cherchera alors la provenance de ces signaux en réalisant une interprétation des termes en accélération ainsi qu'une analyse de la répartition spatiale des stations.

Les mouvements transitoires observés dans les séries des stations proviendraient d'un signal environnemental (l'artéfact méthodologique étant écarté). Un des acteurs majeurs de ces mouvements pourrait être l'hydrologie, avec deux modèles de réponses : soit une réponse élastique de la Terre à la surcharge hydrologique soit la théorie de la poroélasticité avec la déformation des sols poreux en fonction de la quantité d'eau présente.

Il existe différents modèles de surcharges hydrologiques basés sur des modèles hydrologiques comme ERA, GLDAS2, MERRA2 etc. Ces modèles de surcharge hydrologique sont évalués par l'EOST¹ aux endroits des stations géodésiques. Ces modèles de surcharge ne sont pas pris en compte lors des traitements GNSS mais ils seront utilisés en tant que points de comparaison avec les séries des stations pour présenter et caractériser les signaux annuels et les signaux long terme. Toutefois, ces modèles ne préconisent pas de tendance long terme. Ainsi, sur une longue période d'observation, ils ne sont pas cohérents avec les séries GNSS. D'autres éléments environnementaux viennent alors influencer les déformations de la croûte terrestre. La variabilité du signal long terme entre stations proches montre que ces phénomènes qui engendrent des déformations de la croûte terrestre sont probablement beaucoup plus locaux que les modèles de surcharge. On mènera alors une étude rapprochée des stations comportant des signaux transitoires long terme avec des accélérations (positives ou négatives) significatives en regardant des phénomènes proches tels que les mesures des précipitations, la géologie du sol, la présence de surfaces d'eau ...

La première partie (I) proposera une définition des mouvements transitoires. Une description listant et présentant les déformations de la Terre engendrées par les phénomènes de surcharge maréales et non-maréales est fournie en deuxième partie (II). La troisième partie décrira les données GPS (III) en détaillant les différentes méthodes de réalisation des solutions pour percevoir les points communs et les dissemblances entre les solutions. Ces données seront ensuite analysées et comparées avec une détermination des termes en accélération et en vitesse et la réalisation de séries temporelles pour chaque station de chaque solution. La quatrième partie (IV) présentera les résultats, de la comparaison des séries réalisées dans la partie III et des modèles de surcharges présentés

¹ <http://loading.u-strasbg.fr/>

en Annexe 4 pour exposer les signaux annuels et identifier et caractériser les signaux long terme. Par la suite on mènera une étude rapprochée des stations comportant des signaux transitoires long terme avec les phénomènes locaux (les mesure des précipitations, la géologie du sol, la présence de surfaces d'eau ...) pour interpréter ces signaux.

I Les mouvements transitoires

Deux éléments sont à définir : le mouvement qui va caractériser le déplacement d'un corps par rapport à un référentiel et le phénomène transitoire qui correspond à l'évolution d'un système qui n'est pas dans un état stable.

Le mouvement étudié est celui du déplacement des stations du RENAG ; il est caractérisé par trois translations sur trois composantes (Nord, Est et Up). Pour les solutions SCRS et EPOS (INGV) elles sont données dans le système de coordonnées suivant :

- Type de coordonnées : cartésienne
- Système de référence : WGS84
- Ellipsoïde : IAG GRS80
- Méridien d'origine : Greenwich

Le déplacement est obtenu à partir de la différence entre les coordonnées du point calculé et les coordonnées du point de référence de la station.

Pour les données issues des solutions GAMIT et EPOS (CNRS-ISTerre), elles sont obtenues par comparaison de distance par rapport à un point d'origine de latitude 0° et de longitude 0° .

Le cadre de référence pour le calcul de ces solutions est l'ITRF 2005 pour la solution SCRS et l'ITRF 2008 pour les trois autres solutions.

La caractéristique du mouvement transitoire est qu'il est non uniforme, c'est-à-dire que le vecteur vitesse n'a pas toujours la même direction, le même sens et la même valeur : il n'est pas constant. Le vecteur vitesse n'étant pas constant, par dérivation on obtient un vecteur accélération qui est non nul.

Les mouvements transitoires sont donc représentés par un déplacement où les vitesses ne sont pas constantes. On peut observer des mouvements transitoires liés aux

phénomènes de surcharges saisonnières (atmosphériques, océaniques, hydrologiques). Mais on peut aussi observer des mouvements transitoires sur une autre échelle de temps : le long terme. Cependant, il reste encore à définir les phénomènes de surcharge qui jouent sur ces déplacements. Les mouvements transitoires peuvent être résumés à tous les mouvements qui ne sont pas liés à la tectonique des plaques qui crée la partie linéaire du déplacement.

II Les déformations de la Terre

La Terre est en permanence soumise à différents types de contraintes qui engendrent des déformations à sa surface. Les contraintes les plus importantes sont la tectonique des plaques qui agit sur le long terme et les séismes qui créent les déformations les plus fortes instantanément. Les déformations plus faibles sont liées par exemple à la fonte des glaces ; les déformations variables à court terme sont générées par exemple par les marées, la charge atmosphérique, ou les eaux souterraines.

Ces différentes contraintes peuvent générer des déformations de la croûte terrestre qui sont notables dans les mesures géodésiques. La croûte terrestre est composée de la croûte continentale pour les continents (avec une épaisseur d'environ 30 km)² et de la croûte océanique sous les océans (avec une épaisseur d'environ 6 km)¹ (Fig. 1). La connaissance des contraintes et la mesure de la déformation engendrée permettent par exemple de déduire les propriétés rhéologiques de la croûte terrestre (élastique, visqueux).

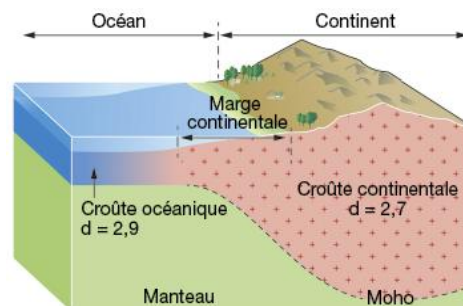


Figure 1 : Structure de la croûte terrestre : croûte continentale et océanique³

On retrouve ces déplacements/déformations de la croûte terrestre dans les séries temporelles des stations GNSS sous forme d'un taux de déplacement constant correspondant à la tectonique des plaques, sur lequel sont superposés des mouvements transitoires (déplacements variables dans le temps). Dans la présente étude, on cherche à

² <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/structure-terre-croûte-terrestre-2491/>

³ <https://www.annabac.com/revision-bac/les-caracteristiques-du-domaine-continentale>

déterminer l'origine de ces mouvements transitoires. Une fois qu'ils seront bien identifiés, on pourra les séparer dans les séries temporelles pour faire mieux ressortir le faible signal tectonique en France métropolitaine.

Les contraintes peuvent être catégorisées en deux parties avec les surcharges maréales et les surcharges non-maréales.

Les déformations liées aux surcharges maréales sont prises en compte lors du traitement GNSS ; il existe des modèles qui permettent de les corriger. Les différents types de surcharges maréales sont présentés en Annexe 1 car on ne les utilise pas pour interpréter les mouvements transitoires résiduels.

Dans les déformations non-maréales, on trouve d'autres phénomènes de surcharge qui viennent déformer la croûte terrestre ; c'est le cas de la surcharge atmosphérique non-maréale, de la surcharge liée à la pression des fonds des océans/mers (ces deux surcharges sont présentées en Annexe 2 car elles ne sont pas utilisées par la suite) et de la surcharge hydrologique. Les modèles hydrologiques ne sont pas encore assez précis pour être intégrés dans les traitements GNSS. L'hydrologie est alors un candidat potentiel pour expliquer les mouvements transitoires persistants dans les séries temporelles GNSS. Ainsi, on s'intéressera plus particulièrement aux réponses/déformations de la Terre liées au phénomène de surcharge hydrologique. Le type de sol peut entraîner une réponse différente. Il existe deux modèles de réponse : la réponse élastique de la Terre et la théorie de la poroélasticité.

II.1 La réponse élastique de la Terre à la surcharge hydrologique

Dans le cas d'une déformation élastique une fois que la contrainte est relâchée, la croûte terrestre revient dans son état initial. La réponse élastique de la Terre à la surcharge hydrologique (Fig. 2) résulte du poids de l'eau apporté dans et sur le sol. Cela crée une déformation élastique de la croûte terrestre avec un enfoncement du sol sous la force de pression exercée par la charge d'eau. Cet enfoncement, en s'éloignant de la zone de la surcharge hydrologique maximale induit des plis et surélève la croûte terrestre. Cette réponse affecte principalement la composante verticale. Elle est sensible aux phénomènes saisonniers, en particulier aux précipitations avec la charge en eau apportée. Cela peut entraîner des déplacements verticaux d'environ 15 mm pouvant aller jusqu'à 30 mm dans certaines régions (van Dam et al., 2001). Ce type de surcharge nous intéresse particulièrement car elle peut induire une variabilité long terme avec un signal qui apparaît

sur des périodes de quelques années et des variations de vitesse pouvant atteindre 2,5 mm/an dans certaines régions (van Dam et al., 2001).

II.2 La théorie de la poroélasticité

Dans le cas des sols poreux, il est possible d’avoir une réponse à un apport en eau par une déformation sous forme de gonflement. Ce type de réponse résulte de plusieurs facteurs tels que la taille des pores du sol (le type de sol), le volume des pores et la pression interstitielle du sol. La pression interstitielle est la pression de l'eau à un endroit donné d'un sol ou d'une roche. Ce type de réponse, pour les sols poreux, va dépendre de la perméabilité du sol. En effet, la réponse n’est pas de la même amplitude si le sol est drainé ou non. Pour les sols non drainés, la réponse sera plus importante que pour les sols drainés (DETOURNAY et al, 1993) car le fluide est piégé dans le solide poreux.

Si la pression appliquée dans le sol augmente via un apport d’eau et qu’elle dépasse un certain seuil (seuil de saturation), la pression va entraîner une déformation de la croûte terrestre poroélastique avec un gonflement du sol poreux, principalement sur la composante verticale (Fig. 3). Comme la réponse élastique, cette réponse poroélastique est sensible aux phénomènes saisonniers ; cependant, la réponse poroélastique est opposée à la réponse élastique. La déformation va dépendre de la quantité d’eau présente dans le sol. Lorsque les sols seront chargés d’eau, les pores vont gonfler et le sol en surface va s’élever et inversement, lorsque les pores vont se compacter, le sol en surface va s’affaisser (PUSKAS et al, 2017).

Réponse élastique de la croûte terrestre à la surcharge hydrologique

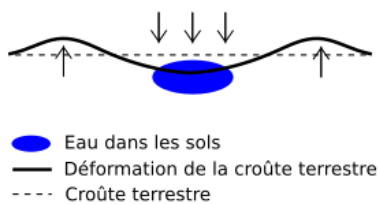


Figure 2 : Schéma de la réponse élastique de la croûte terrestre

Réponse poroélastique de la croûte terrestre à la surcharge hydrologique

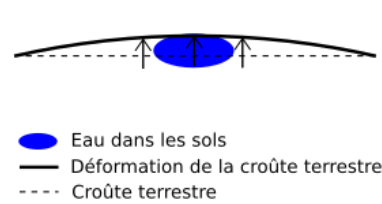


Figure 3 : Schéma de la réponse poroélastique de la croûte terrestre

II.3 La circulation des fluides en profondeur

Les mesures GNSS à la surface ne sont probablement pas sensibles à des déformations en profondeur. Le phénomène de circulation des fluides n'étant pas interprété par la suite dans les séries temporelles, il est présenté en Annexe 3.

III Données GPS

III.1 Les différentes méthodes de traitement des données

Différentes solutions GPS (GAMIT, EPOS (CNRS-ISTerre), EPOS (INGV) et SCRS) seront comparées dans le but d'identifier les signaux transitoires persistants pour vérifier qu'ils ne proviennent pas de la méthode de traitement (PPP ou double différence). Ainsi, ces solutions et ces différentes méthodes de traitement des données vont être examinées pour mettre au jour leurs caractéristiques et leurs dissemblances.

III.1.1 Méthode de la double différence

Cette méthode est plus précise que celle de la simple différence, car elle consiste lors du traitement des données à éliminer les erreurs d'horloge du satellite et du récepteur. Pour réaliser cette méthode, deux récepteurs doivent enregistrer les signaux de deux satellites simultanément (Fig. 4). Ceci permet d'obtenir deux équations du signal, une pour chaque récepteur en fonction des deux satellites. C'est en faisant la différence entre ces deux équations que les erreurs d'horloges des récepteurs et des satellites disparaissent.

Attention, la méthode des doubles différences donne le positionnement relatif entre les deux récepteurs avec la création de ligne de base et non la position absolue avec la détermination des coordonnées des récepteurs.

III.1.2 Méthode PPP

Cette méthode permet d'obtenir un positionnement précis en utilisant un seul récepteur (Fig. 5), avec une précision centimétrique en mode statique (CHASSAGNE O., 2012).

À l'inverse de la double différence, il n'y a pas besoin d'avoir des observations simultanées avec un second récepteur. La méthode PPP utilise principalement les mesures de pseudo-distances et les mesures de déphasages. Les mesures de pseudo-distances sont

réalisées à partir des codes envoyés par les satellites. Ceci permet d'avoir une précision comprise entre 5 et 10 mètres ce qui correspond à la méthode SPP (Single Point Positioning) (MOREL L., et al 2014). Les mesures de déphasage sont utilisées et combinées à ces mesures de pseudo-distances pour permettre de lever les ambiguïtés de phase entre le satellite et le récepteur. Contrairement à la méthode de la double différence la position du récepteur sera calculée, mais avec des observations non-différenciées. Certaines erreurs comme les erreurs d'horloge ne seront pas éliminées, il sera alors nécessaire d'utiliser des corrections d'horloges et d'orbites. Le terme d'erreur d'horloge n'est plus éliminé comme avec la méthode de la double différence, il est estimé.

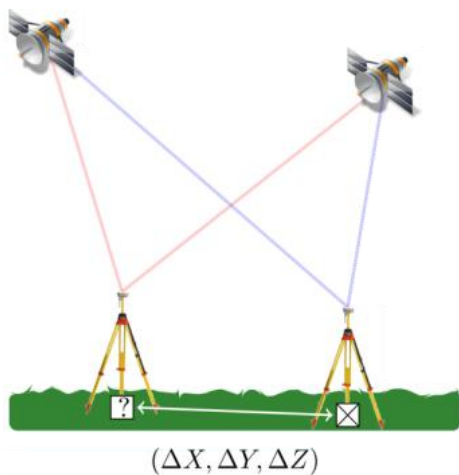


Figure 4 : Schéma du principe de la double différence⁴



Figure 5 : Schéma de la méthode PPP⁵

Pour les deux méthodes, deux couches de l'atmosphère viennent affecter la propagation des ondes GNSS, c'est l'ionosphère et la troposphère. Il est donc nécessaire de les prendre en compte.

La traversée de l'ionosphère perturbe la vitesse de l'onde électromagnétique. En effet, le temps de propagation de l'onde est affecté car cette couche est composée de particules chargées (des ions). Le délai ionosphérique est éliminé par la combinaison LC (Ionosphere free, avec la combinaison des ondes L1 et L2).

La traversée de la troposphère entraîne elle aussi une perturbation du temps de propagation de l'onde, imprédictible en particulier en raison de la vapeur d'eau présente dans cette couche. La différence est que cette fois l'erreur due au délai troposphérique n'est pas éliminée par combinaison des ondes L1 et L2, mais elle est estimée simultanément avec les positions, en utilisant une fonction de projection troposphérique.

⁴ <http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php>

⁵ <http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php>

III.2 Présentation des différents logiciels/outils utilisés et des solutions

La méthode adoptée pour les solutions GAMIT et EPOS (CNRS-ISTerre) est celle de la double différence avec l'utilisation du logiciel de traitement GAMIT. La solution SCRS se sert du même code qui est utilisé avec l'outil en ligne (PPP-SCRS) disponible sur le site des ressources naturelles du Canada, mais en local, car les services web ne sont pas adaptés pour traiter une grande quantité de données. Cet outil permet de calculer la solution avec la méthode PPP en temps différé (avec des données en mode statique). La solution EPOS (INGV) se sert elle aussi de la méthode PPP, mais par le biais d'un logiciel développé par le JPL (GIPSY/OASIS du Jet Propulsion Laboratory).

III.2.1 Logiciel GAMIT (Herring et al.,2010)

Le logiciel GAMIT est un logiciel créé par l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT), le centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian (CfA), l'institut d'océanographie Scripps (SIO) et l'université nationale australienne. GAMIT est basé sur la détermination des lignes de bases avec la méthode de la double différence pour calculer un positionnement plus précis. Ce calcul permet d'estimer les coordonnées des stations ainsi que certains paramètres tels que les orbites des satellites, les retards atmosphériques et les paramètres d'orientation de la Terre. Les solutions journalières sont ensuite combinées avec un filtre de Kalman (GLOBK) pour établir des séries temporelles de positions ou les vitesses des stations. GAMIT calcule toutes les lignes de base d'un réseau simultanément ; la position des stations d'un réseau est alors contrainte par les autres stations de ce même réseau mesurées simultanément. Plus le réseau est grand, plus il y a des lignes de base déterminées en même temps et plus la position est bien contrainte. Donc un grand réseau est plus précis qu'un petit réseau.

III.2.2 Logiciel GIPSY/OASIS (ZUMBERGE et al, 1997)

Le logiciel GIPSY/OASIS est développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) situé aux USA. Ce logiciel utilise la méthode PPP avec un filtre SRIF (Square Root Information Filter). Ce filtre est utilisé pour estimer des paramètres qui sont inconnus sous forme de bruit tel que le décalage d'horloge du satellite et du récepteur. Le logiciel utilise les estimations des observations non différenciées (mesures de déphasage/ mesures de pseudo-distance) pour pouvoir déterminer les ambiguïtés par convergence. Ceci permet de

calculer en simultané tous les paramètres tels que les positions, les paramètres troposphériques et les erreurs d'horloges des satellites/récepteurs.

III.2.3 Outil PPP-SCRS

L'outil PPP-SCRS est développé par les ressources naturelles du Canada (HEROUX et al 2001), il utilise la méthode PPP et le système canadien de référence spatiale (SCRS). Cet outil permet de réaliser le traitement à partir de données GNSS brutes (données RINEX), afin d'obtenir de positions précises. Ces positions peuvent être obtenues soit dans le système SCRS, soit dans le système International de Référence Terrestre (ITRF). Cet outil peut être utilisé pour une station GNSS n'importe où sur la Terre, car il utilise les éphémérides d'orbites précises des satellites GNSS recalculés par l'IGS pour déterminer les coordonnées, ainsi, ni la localisation, ni la proximité avec une station de base importe. Il existe trois types d'éphémérides recalculées par l'IGS : les orbites ultrarapides (± 15 cm), les orbites rapides (± 5 cm) et les orbites finales (± 2 cm). Pour le post-traitement, les éphémérides les plus précises seront utilisées. Ce traitement permet d'obtenir comme résultat le positionnement, les informations d'horloge et les résidus pour chaque paire époque/signal.

III.2.4 Présentation des solutions

Les quatre solutions n'ont pas les mêmes paramètres et modèles. Leur comparaison doit permettre de voir si les signaux transitoires obtenus dans les séries temporelles des stations proviennent d'une méthode de traitement ou des phénomènes environnementaux.

La solution GAMIT est calculée par WALPERSDORF Andréa à l'université Grenoble Alpes. Elle est déterminée à partir du logiciel GAMIT, cette solution comporte 140 stations localisées en France. Les données sont analysées avec un réseau de taille maximum (proche de 99 stations), et un deuxième réseau complémentaire avec le reste des stations. L'intérêt de prendre un réseau de taille maximum est de maximiser le nombre de contraintes lors de la détermination des positions de stations afin d'avoir des données plus précises. Les paramètres et modèles (WALPERSDORF A. et al 2015) utilisés par cette solution sont détaillés dans le tableau 1.

La solution EPOS (CNRS-ISTerre) est calculée par SOCQUET Anne à l'université Grenoble Alpes. Elle est également réalisée via le logiciel GAMIT. Elle se sert des stations

issues du réseau européen EPOS-GNSS. Ce réseau est composé d'un ensemble de 1500 stations situées à travers l'Europe auquel contribue le réseau GNSS permanent national RENAG. Les données sont analysées en sous-réseaux (15) avec environ 40 stations par réseau. La taille des réseaux choisie pour cette solution est beaucoup plus petite que pour la solution GAMIT, les réseaux seront alors moins contraints. Les paramètres et modèles (DEPREZ A. et al) utilisés par cette solution sont détaillés dans le tableau 1.

La solution SCRS est calculée par VERNANT Philippe à l'université de Montpellier. Cette solution est réalisée avec l'outil PPP-SCRS. Les paramètres et modèles (NGUYEN H. N. et al 2016) utilisés par cette solution sont reportés dans le tableau 1.

La solution EPOS (INGV) est calculée par D'AGOSTINO Nicola à l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). Cette solution est réalisée avec le logiciel GIPSY/OASIS. Elle utilise les données GNSS provenant du réseau EPOS auquel contribue le réseau GNSS comportant les stations du RENAG. Cette solution est composée d'un ensemble de 573 stations (73 stations RENAG, 191 stations RING, 22 stations NOA, 265 stations EPN et 22 stations IGS) situées à travers l'Europe. Les coordonnées des stations sont obtenues à partir d'estimations journalières en réseau libre pour tous les sites. Les paramètres et modèles utilisés par cette solution sont résumés dans le tableau 1.

III.2.5 Paramètres et modèle des solutions

Tableau résumé des paramètres et modèles utilisés (Tab. 1) :

		Double différence		PPP	
		GAMIT	EPOS (CNRS-ISTerre)	SCRS	EPOS (INGV)
Logiciel		GAMIT	GAMIT	PPP-SCRS	GIPSY/OASIS
Intervalle de temps couvert		1998/2017	2000/2018	1998/2017	2000/2017
Paramètres	Orbites	MIT (réajustée)	IGS	IGS	IGS
	Délai troposphérique zénithal	Toutes les 2 h		Toutes les 5 min	Toutes les 2 h
	Couple de gradients troposphériques horizontaux	2 pour 24 h	1 pour 24 h	1 pour 6 h	1 pour 24 h
	Fonction de projection troposphérique	Vienne VMF1			

Surcharges maréales	Marrée de la Terre solide	Constante de Love		✓	IERS 2010
	Surcharge océanique	FES2004			Modèle GOT.8ac et hardisp.f
	Marrée polaire	IERS 2010		✗	IERS 2010
	Surcharge atmosphérique	✓	✗	✗	✗
Surcharges non-maréales	Surcharge atmosphérique	✓	✗	✗	✗

Tableau 1 : Tableau résumé des paramètres et modèles des différentes solutions GPS

La solution GAMIT est la seule solution de cette comparaison à corriger la surcharge atmosphérique maréale et non maréale. La surcharge atmosphérique non maréale est corrigée selon le papier Tregoning and van Dam, 2005.

Il n'y a pas de surcharge atmosphérique (marée ou non) prise en compte dans les deux solutions EPOS, car pour la solution EPOS issue de GIPSY il n'était pas encore possible d'implémenter les corrections de surcharges atmosphériques. Ces corrections n'ont alors pas été prises en compte dans la solution EPOS issue de GAMIT dans le but d'avoir deux solutions EPOS les plus comparables possible.

Pour la solution EPOS (INGV), la surcharge océanique n'est pas corrigée avec le modèle FES2004 comme pour les trois autres solutions. La surcharge océanique diurne, semi-diurne, selon la composante mensuelle des marées Mm et bimensuelle Mf est corrigée avec le modèle GOT.8ac et la surcharge océanique semestrielle avec le programme fortran hardisp.f⁶ provenant de IERS 2010. Ce programme retourne les déplacements de chargement de marées océaniques pour les composantes Up, Ouest et Sud. Le modèle programmé pour cette fonction utilise une interpolation par spline pour déterminer les amplitudes et phases des phénomènes des marées.

Les quatre jeux de données sont fournis avec des incertitudes pour chaque position journalières. Ces données sont moyennées pour chaque composante. Elles représentent la dispersion des mesures par rapport à la moyenne donnée. Les incertitudes moyennées pour chaque station sont résumées dans un tableau (Annexe 5). Le tableau 2 donne les moyennes des résultats présentés en Annexe 1 pour chaque solution.

⁶ <http://iers-conventions.obspm.fr/content/chapter7/software/hardisp/HARDISP.F>

⁷ <http://sagascience.cnrs.fr/dosgeol/glossaire/Images/failNorm.html>

Moyennes des incertitudes types (mm)												
Solution	EPOS (CNRS-ISTerre)			EPOS (INGV)			GAMIT			SCRS		
Composante	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up
Moyenne	2,21	1,94	7,45	0,65	1,40	0,51	1,03	0,91	3,42	1,06	1,90	3,38

Tableau 2 : Moyenne des incertitudes pour chaque solution

Les incertitudes sont proches du millimètre pour les solutions EPOS (INGV), GAMIT et SCRS, avec une dispersion un peu plus forte pour les solutions GAMIT et SCRS sur la composante verticale (de l'ordre de 3 millimètre).

Celles fournies pour la solution EPOS (CNRS-ISTerre) sont plus élevées avec des valeurs proches de 2 millimètre sur le plan horizontal pour les composantes Nord et Est et des valeurs proches de 7,5 millimètre pour la composante Up.

Les valeurs des incertitudes fournies proviennent du paramétrage des solutions. Elles sont formelles et ne permettent pas de présumer de la précision d'une solution.

III.3 Réalisation d'un procédé de traitement et analyse des séries temporelles

III.3.1 Descriptions des séries temporelles

Les séries temporelles GNSS utilisées sont issues de quatre solutions différentes. La solution EPOS (CNRS-ISTerre) comporte 1571 stations et la solution GAMIT 140 stations. De la solution EPOS (INGV), 73 stations RENAG ont été extraites, et 75 stations RENAG de la solution SCRS. La résolution temporelle de ces séries est journalière.

Pour les séries temporelles issues des solutions GAMIT et EPOS (CNRS-ISTerre), les déplacements sont fournis avec un fichier pour chaque composante (Dat1 : composante Nord, Dat2 : composante Est et Dat3 : composante Up). De plus, les séries sont segmentées en fichier _GPS, _2PS, 3PS... Cette segmentation est réalisée dans le but de séparer les données dès lors qu'il y a un changement d'antenne. Si ces changements ne sont pas pris en compte, on obtient des sauts de déplacement dans les courbes. Ces sauts, s'ils ne sont pas détectés, perturbent la détermination des mouvements en accélération/vitesse (Fig. 6). La Fonction 1 sur le graphique représente une équation du second degré dans laquelle les paramètres déterminés (vitesses et accélérations) sont faussés à cause du saut.

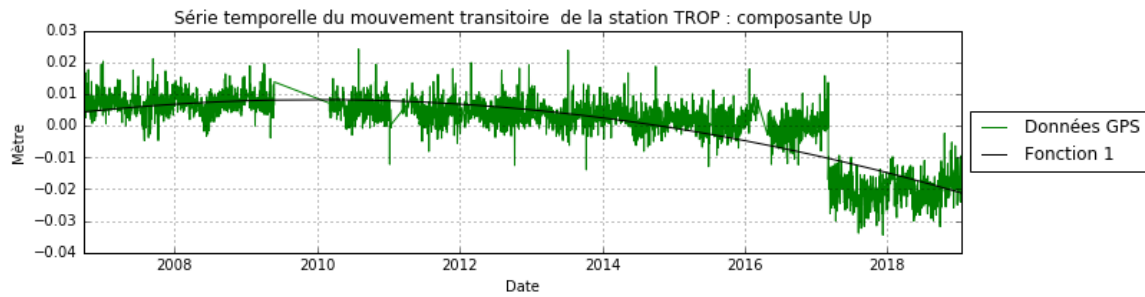


Figure 6 : Saut lié à un changement d'antenne non pris en compte (station TROP, solution EPOS, composante Up)

Pour les séries issues des solutions SCRS et EPOS (INGV), les déplacements Nord, Est et Up sont fournis dans un fichier unique pour chaque station déjà segmenté en fonction des sauts.

Dans notre étude, nous souhaitons examiner les mouvements transitoires long terme qui sont visibles seulement sur une longue période d'acquisition. Pour cela, les stations ayant une période d'acquisition inférieure à cinq ans n'ont pas été prises en compte.

La solution EPOS (INGV) étant obtenue plus tardivement, elle n'a pas été utilisée lors de l'exécution et de la réalisation des tests 1 et 2 présentés par la suite. Elle apparaîtra seulement à partir de la partie III.4.3.3 Test 3.

III.3.2 Méthode de détermination des vitesses et accélérations

Les différentes solutions GPS contiennent des déplacements selon les composantes Nord, Est et Up. À partir de ces données, on obtient des graphiques représentant les déplacements dans lesquels on va quantifier les mouvements en accélération et en vitesse (Fig. 7). Cette évaluation des mouvements se fait en déterminant la courbe d'ordre 2 qui passe au plus proche de l'ensemble des points. Un polynôme d'ordre 2 est utilisé car cela va permettre d'obtenir des valeurs en accélération et ainsi observer s'il y a des variations de vitesses.

L'équation est : $0.050 + 1.004 \times x - 0.002 \times x^2$. C'est une fonction d'ordre deux du type $c + bx + ax^2$. Cette fonction représente la meilleure courbe de cet ordre pour décrire l'évolution des points. Il y a donc un terme en vitesse de 1.004 mm/an et un terme en accélération de -0.002 mm²/an (dans ce cas l'accélération est quasi nulle). C'est en se basant sur cette méthode que les vitesses et les accélérations vont être déterminées pour toutes les stations.

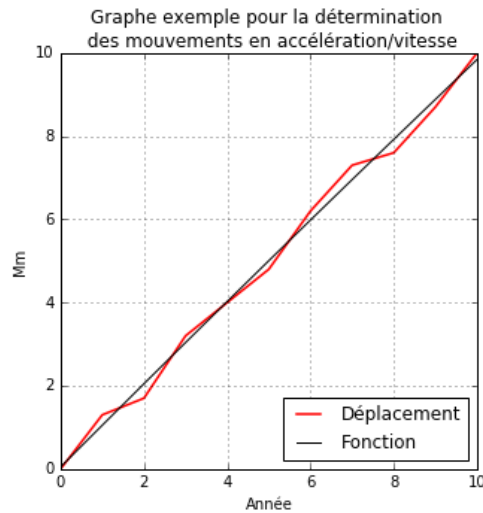


Figure 7 : Grphe d'un exemple pour la détermination des termes en accélération/vitesse

III.3.3 Détermination des vitesses et accélérations des stations du RENAG

Cette détermination amènera à une comparaison des accélérations des stations du RENAG issues de quatre solutions (GAMIT, EPOS (CNRS-ISTerre), SCRS et EPOS (INGV)). Trois tests ont été effectués pour évaluer l'influence de l'ordre de détermination des termes en vitesse et accélération et de l'intervalle couvert par les séries sur la solution.

III.3.3.1 Test 1

Détermination d'une équation du second degré du type : $ax^2 + bx + c$

- Moyenne des différences des vitesses sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an			
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre)-SCRS
$\Delta Nord_v$	0,191	0,456	0,511
ΔEst_v	0,228	0,627	0,614
ΔUp_v	0,627	0,864	1,062

Tableau 3 : Moyennes des différences des vitesses avec le test 1

- Moyenne des différences des accélérations sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an ²			
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) - SCRS
$\Delta Nord_a$	0,021	0,046	0,042
ΔEst_a	0,023	0,060	0,061
ΔUp_a	0,053	0,097	0,095

Tableau 4 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 1

Les résultats issus de la comparaison des trois solutions pour les termes en accélération (Tab. 4) semblent cohérents. On trouve des écarts faibles (0,020 mm/an² pour les composantes Nord/Est et 0,050 mm/an² pour la composante Up en moyenne pour toutes les stations) lors de la comparaison des solutions GAMIT et EPOS (CNRS-ISTerre). Dès que l'on compare ces solutions avec la solution SCRS les résultats augmentent (0,040 mm/an² pour les composantes Nord/Est et 0,095 mm/an² pour la composante Up). Les résultats sont proches du double dès lors qu'on compare avec la solution SCRS. Ces valeurs sont dues à la précision du traitement PPP-SCRS.

La différence dans les ordres de grandeur entre les termes sur les composantes horizontales et la composante verticale provient de la variabilité des données. En effet, la même précision n'est pas atteinte, car les données de la composante Up sont dispersées de [+0,015 ; -0,015] mètres, alors que pour les composantes Nord et Est ils vont de [+0,005 ; -0,005] mètres. La dispersion étant plus grande, cela ajoute une imprécision dans la détermination des paramètres a, b et c d'une équation du second degré.

Pour ce qui concerne les résultats sur les termes en vitesse (Tab. 3), on observe les mêmes phénomènes que cités précédemment avec des valeurs proches du double dès qu'on compare avec la solution SCRS. Il y a également un facteur de deux entre les résultats pour les composantes Nord/Est et la composante Up.

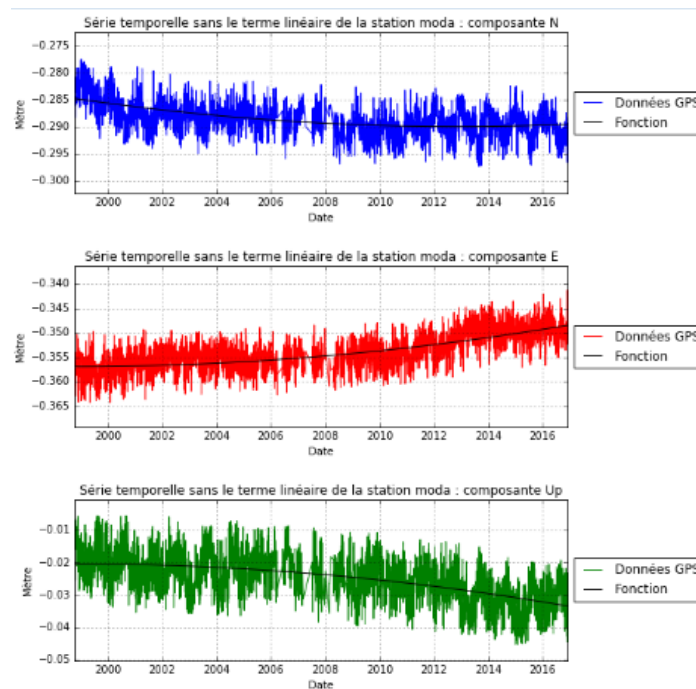


Figure 8 : Série temporelle sans le terme linéaire réalisée avec la méthode 1 pour la station MODA et la solution SCRS

La détermination des termes en vitesse sert à enlever le terme linéaire des données. En effet, l'accumulation due à la vitesse va être supprimée dans les données pour mieux visualiser la variabilité court terme ou une accélération long terme.

Avec cette méthode, une tendance persiste dans les séries (Fig. 8). Cette tendance empêchant de faire une interprétation claire des données, on fait l'hypothèse suivante : si la détermination des termes en accélération et en vitesse se fait de façon simultanée, il y a une dilution du terme en vitesse dans le terme en accélération.

III.3.3.2 Test 2

Détermination dans un premier temps des vitesses avec une équation du premier degré du type : $bx + c$

- Moyenne des différences des vitesses sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an			
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) - SCRS
ΔN_v	0,067	0,316	0,289
ΔE_v	0,148	0,357	0,284
ΔUp_v	0,385	0,271	0,453

Tableau 5 : Moyennes des différences des vitesses pour la première détermination avec le test 2

Les moyennes des écarts obtenues avec cette méthode donnent un meilleur résultat. Cette méthode fait gagner en précision sur la détermination des termes en vitesses (avec un facteur de division proche de 2) entre les différentes solutions. Dans un second temps, après avoir enlevé le terme linéaire des données, on détermine une équation du second degré du type : $ax^2 + bx + c$. Une deuxième vitesse va être estimée pour chaque station, cependant ces vitesses seront très faibles car le terme linéaire à été retiré des données :

- Moyenne des différences des vitesses sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an			
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) - SCRS
ΔN_v	0,197	0,483	0,470
ΔE_v	0,222	0,563	0,222
ΔUp_v	0,524	0,908	0,905

Tableau 6 : Moyennes des différences des vitesses pour la deuxième détermination avec le test 2

- Moyenne des différences des accélérations sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an ²			
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) - SCRS
ΔN_a	0,022	0,045	0,041
ΔE_a	0,023	0,059	0,060
ΔUp_a	0,055	0,096	0,096

Tableau 7 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 2

L'ordre de grandeur de la deuxième détermination des vitesses est de l'ordre de $1.10^{-5}/1.10^{-4}$ m/an. Cet ordre de grandeur est dû à la suppression du terme linéaire. Les moyennes sur les écarts pour les termes en vitesses entre la méthode 1 et 2 sont proches. On obtient sensiblement les mêmes moyennes bien que pour la deuxième méthode le terme linéaire soit déjà supprimé, à cause de la dilution de contraintes sur les vitesses lors de l'estimation simultanée des accélérations. Ceci vient valider notre double détermination des vitesses, car il n'y a pas d'influence sur les écarts entre les 3 solutions. De même pour les accélérations, elles restent inchangées avec un écart max sur les moyennes de 2.10^{-6} mètres/an² entre les déterminations issues des méthodes 1 et 2.

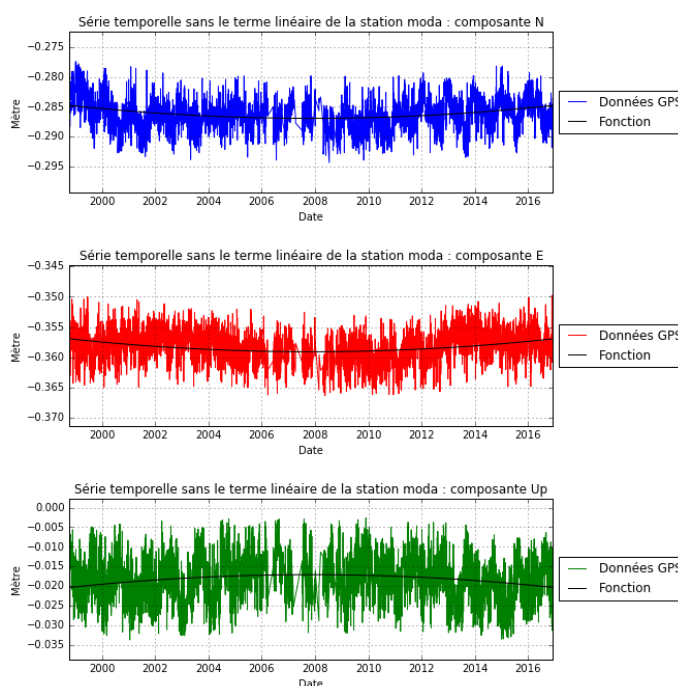


Figure 9 : Série temporelle sans le terme linéaire réalisée avec la méthode 2 pour la station MODA et la solution SCRS

Ainsi, les données issues de la méthode 2 permettent une meilleure détermination des vitesses. La tendance qui persistait avec la méthode 1 n'est plus visible (Fig. 9). Il est

alors possible de réaliser une analyse et une interprétation pour chaque série temporelle. Cependant, dès lors qu'on souhaite comparer graphiquement les séries issues des différentes solutions, on se rend compte que la période d'observation sur laquelle sont réalisées les séries intervient dans la détermination/valeur des paramètres. Ainsi, on fait une autre hypothèse dans laquelle la limitation sur une période d'étude des données commune aux différentes solutions pourrait améliorer les résultats d'une comparaison intersolutions.

III.3.3.3 Test 3

Cette méthode reprend le principe du test n°2, cependant la détermination se fera sur une période commune aux quatre solutions, et on intègre la solution EPOS (INGV) dans la comparaison. Résultat pour la première détermination des vitesses avec une équation du premier degré du type : $bx + c$

- Moyenne des différences des vitesses sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an						
	GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-EPOS (INGV)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) - EPOS (INGV)	EPOS (CNRS-ISTerre) - SCRS	EPOS (INGV) – SCRS
ΔN_v	0,049	0,269	0,296	0,298	0,271	0,531
ΔE_v	0,120	0,117	0,328	0,051	0,244	0,247
ΔUp_v	0,385	0,182	0,194	0,395	0,436	0,189

Tableau 8 : Moyennes des différences des vitesses pour la première détermination avec le test 3

Les moyennes sur les écarts entre les différentes solutions sont plus faibles qu'avec l'utilisation de la méthode 2 (pour les solutions GAMIT, EPOS (CNRS-ISTerre) et SCRS). La première détermination des termes en vitesse sur une période commune aux quatre solutions permet de déterminer des vitesses qui sont plus cohérentes entre les solutions. Les moyennes sur les écarts obtenus avec la solution EPOS (INGV) sont du même ordre de grandeur que les résultats obtenus pour les autres solutions.

Résultat pour la deuxième détermination avec une équation du second degré du type : $ax^2 + bx + c$

- Moyenne des différences des vitesses sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an						
	GAMIT-EPOS (CNRS- ISTerre)	GAMIT- EPOS (INGV)	GAMIT- SCRS	EPOS (CNRS- ISTerre) - EPOS (INGV)	EPOS (CNRS- ISTerre) - SCRS	EPOS (INGV) – SCRS
ΔN_v	0,122	0,207	0,508	0,139	0,513	0,582
ΔE_v	0,138	0,184	0,673	0,168	0,138	0,726
ΔUp_v	0,313	0,617	0,607	0,670	0,601	0,860

Tableau 9 : Moyennes des différences des vitesses pour la deuxième détermination avec le test 3

- Moyenne des différences des accélérations sur les 3 composantes de toutes les stations entre couples de solutions :

Moyenne des différences en mm/an ²						
	GAMIT-EPOS (CNRS- ISTerre)	GAMIT- EPOS (INGV)	GAMIT- SCRS	EPOS (CNRS- ISTerre) - EPOS (INGV)	EPOS (CNRS- ISTerre) - SCRS	EPOS (INGV) – SCRS
ΔN_a	0,014	0,023	0,052	0,015	0,052	0,059
ΔE_a	0,044	0,020	0,073	0,018	0,084	0,078
ΔUp_a	0,037	0,061	0,076	0,071	0,078	0,105

Tableau 10 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 3

Après cette deuxième détermination, on obtient des résultats assez similaires avec le test 2 (pour les solutions GAMIT, EPOS (CNRS-ISTerre) et SCRS) pour les composantes Nord et Est et des résultats plus cohérents entre les solutions pour la composante Up (avec le test 2, deux ΔUp_v égaux à 0,900 mm/an et deux ΔUp_a égaux à 0,96 mm/an² contre respectivement 0,600 mm/an et 0,78 mm²/an pour le test 3). Ces résultats sont cohérents car c'est sur la composante verticale qu'il y a le plus de variabilité saisonnière et donc un effet plus fort lors de l'estimation des vitesses si la même période lors de la détermination des vitesses/accélérations n'est pas considérée. La solution EPOS (INGV) s'intègre bien dans cette analyse des données, car les résultats obtenus sont similaires aux autres comparaisons intersolutions.

On observe que les deux solutions en doubles différences calculées avec le même logiciel (GAMIT) donnent les valeurs de vitesse et accélération les plus similaires, suivi par la solution EPOS (INGV) en PPP. La solution SCRS (calculée en PPP) a le plus de différences avec toutes les autres solutions, même la deuxième solution PPP EPOS (INGV). La variabilité est plus forte pour les données issues de la méthode PPP ; cela provient de la méthode de traitement car avec cette méthode, les observations sont non-différenciées et de ce fait certains paramètres sont estimés et non éliminés.

III.3.4 Comparaison détaillée des solutions

Différentes comparaisons sont réalisées en se basant sur les résultats du test n°3. La première a pour objectif d'estimer un facteur de corrélation entre les différentes solutions tandis que la deuxième vise à proposer un classement des stations pour lesquelles on retrouve les mêmes mouvements en accélération dans les quatre solutions indépendantes. Le but est d'approfondir l'étude de ces mouvements faibles et long terme sur un nombre plus restreint de stations pour lesquelles nous sommes sûrs que ces accélérations ne correspondent pas à un artéfact provenant d'une des quatre analyses.

III.3.4.1 Corrélation entre les solutions

La corrélation entre solutions permettra de comparer les résultats pour l'ensemble des stations d'un seul coup selon une composante à partir de la covariance et de donner un indicateur sur la corrélation entre les deux solutions pour dire si un lien existe. La loi de Student viendra par la suite donner un degré de confiance pour affirmer si cette liaison est avérée.

Dans les énoncés suivants, X représentera tous les termes en accélération sur une composante pour une solution. De même pour Y, mais pour une autre solution. Avant d'utiliser cette méthode, il convient de vérifier certaines hypothèses :

- Les variables X et Y sont aléatoires. Les données qui permettent d'évaluer les termes en accélération varient aléatoirement au cours du temps en fonction d'éléments/paramètres que l'on cherche à déterminer (l'hydrologie, les précipitations, la géologie...). Les variables X et Y sont bien aléatoires.
- L'association des variables X et Y doit être linéaire. En effet si l'association de ces variables donne une représentation non linéaire (parabolique, exponentielle ...) aucune corrélation ne pourra être constatée. Pour cela, il est important de réaliser dans un premier temps une interprétation géométrique des données. Il conviendra alors de choisir une autre méthode si l'association des variables X et Y n'est pas linéaire. Dans notre cas, l'association des variables X et Y est bien linéaire (voir figure 11 et 12).
- La distribution conditionnelle est normale et à variance constante. C'est-à-dire que pour une valeur de X les valeurs de Y doivent se distribuer de

façon normale et que l'ensemble de cette distribution doit avoir une variance identique.

- Les variables X et Y sont indépendantes. Les trois solutions proviennent de différentes méthodes de calculs, différentes méthodes de traitements et utilisent différents modèles. Les variables X et Y sont bien indépendantes.

Les hypothèses sont validées, ce qui permet d'utiliser cette méthode.

Voici les calculs permettant de déterminer le coefficient de corrélation :

- La covariance : $\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \text{MoyX})(Y_i - \text{MoyY})}{n-1}$ ou MoyX et MoyY représente respectivement les moyennes des valeurs de X et Y et n le nombre de valeurs.
- Le coefficient de corrélation : $\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\text{stdev}(X) \times \text{stdev}(Y)}$ ou stdev(X) et stdev(Y) représente respectivement les écarts types des valeurs de X et Y. Ce coefficient permet de déterminer la force du lien entre les deux variables. Pour une valeur égale à 1, la corrélation est parfaite, égale à -1 elle est inversée. Si cette valeur est égale à 0 il n'y a alors aucune corrélation.

Pour réaliser le test de Student on commence par identifier les deux hypothèses H0 et H1:

- H0 : Il n'y a aucune corrélation entre les deux solutions.
- H1 : Il existe bien un lien entre les deux solutions, cette hypothèse sera adoptée si on rejette l'hypothèse H0.

Voici les calculs permettant de déterminer la probabilité découlant de l'hypothèse H0 :

- Le test de Student : $t = \frac{\text{corr}(X, Y)}{\sqrt{\frac{1 - \text{corr}(X, Y)^2}{n-2}}}$
- La valeur de t permet de trouver la probabilité à l'aide de la table de Student. Cette probabilité est un degré de confiance qui permet d'appuyer ou non l'existence d'un lien entre les deux variables.

Résultats provenant des comparaisons entre les accélérations déterminées avec le test 3 pour les quatre solutions :

		GAMIT-EPOS (CNRS-ISTerre)	GAMIT-EPOS (INGV)	GAMIT-SCRS	EPOS (CNRS-ISTerre) EPOS (INGV)	EPOS (CNRS-ISTerre) -SCRS	EPOS (INGV) -SCRS
Coefficient de Corrélation	Nord	0,952	0,826	0,701	0,892	0,686	0,711
	Est	0,981	0,966	0,813	0,976	0,858	0,799
	Up	0,910	0,843	0,796	0,754	0,658	0,593
Probabilité (en %)	Nord	$0,060 \cdot 10^{-23}$	$0,164 \cdot 10^{-9}$	$0,992 \cdot 10^{-6}$	$0,810 \cdot 10^{-14}$	$0,027 \cdot 10^{-5}$	$0,313 \cdot 10^{-5}$
	Est	$0,108 \cdot 10^{-33}$	$0,181 \cdot 10^{-24}$	$0,431 \cdot 10^{-10}$	$0,597 \cdot 10^{-28}$	$0,853 \cdot 10^{-13}$	$0,285 \cdot 10^{-8}$
	Up	$0,201 \cdot 10^{-17}$	$0,195 \cdot 10^{-10}$	$0,289 \cdot 10^{-9}$	$0,150 \cdot 10^{-6}$	$0,158 \cdot 10^{-4}$	$0,139 \cdot 10^{-2}$

Tableau 11 : Résultats contenant les coefficients de corrélation et les probabilités de l'hypothèse H0 (pas de corrélation entre les deux solutions)

Pour la comparaison GAMIT/EPOS (CNRS-ISTerre), les résultats issus des trois composantes pour ces deux solutions sont très bons avec un coefficient de corrélation très proche de 1 (de 0,91 à 0,98). Ce lien est en plus très significatif avec des probabilités très faibles réfutant l'hypothèse H0 dans laquelle il n'y a aucune corrélation ($P < 10^{-17}$ à $P < 10^{-33}$).

Pour les résultats issus de la comparaison GAMIT/EPOS (INGV) et EPOS (CNRS-ISTerre)/EPOS (INGV), la corrélation est bonne pour toutes les composantes (de 0,76 à 0,98). Ce lien est significatif, avec des probabilités très faibles qu'il n'y ait aucune corrélation ($P < 10^{-6}$ à $P < 10^{-28}$).

Pour les résultats provenant de la comparaison SCRS/GAMIT et EPOS (CNRS-ISTerre)/SCRS, la corrélation reste bonne pour toutes les composantes (de 0,65 à 0,85) avec une probabilité faible ($P < 10^{-4}$ à $P < 10^{-13}$) qui vient confirmer la signification du lien entre ces jeux de données. Les coefficients de corrélation ainsi que les probabilités déterminées lorsqu'on compare avec la solution SCRS sont toutefois moins bons que pour les comparaisons des autres solutions. Cela provient de la précision des résultats de cette solution comme évoqué dans la partie précédente.

Les résultats émanant de la comparaison SCRS/EPOS (INGV) sont les moins bons avec un coefficient de corrélation allant de 0,59 à 0,80 et des probabilités allant de $P < 10^{-2}$ à $P < 10^{-8}$. Les probabilités venant réfuter l'hypothèse H0 sont quand même très faibles ce qui permet d'affirmer que la liaison existe bien. Ces résultats même s'ils sont moins bons que les précédents valident une corrélation entre ces jeux de données, mais affirment aussi que les méthodes de traitement de ces solutions (PPP pour les deux) sont moins cohérentes sur un ensemble de stations.

Exemple avec un graphique (Fig. 10) représentant la répartition des termes en accélération avec la solution EPOS (CNRS-ISTerre) en abscisse et GAMIT en ordonnée pour la composante Nord avec un coefficient de corrélation de 0,95.

Exemple avec un graphique (Fig. 11) représentant la répartition des termes en accélération avec la solution EPOS (CNRS-ISTerre) en abscisse et SCRS en ordonnée pour la composante Nord avec un coefficient de corrélation de 0,68.

La répartition des données dans la figure 10 est contractée autour de la droite déterminée alors que dans la figure 11 les données sont plus diffuses.

Interprétation visuelle des données en accélération pour les solutions GAMIT/EPOS : composante NORD

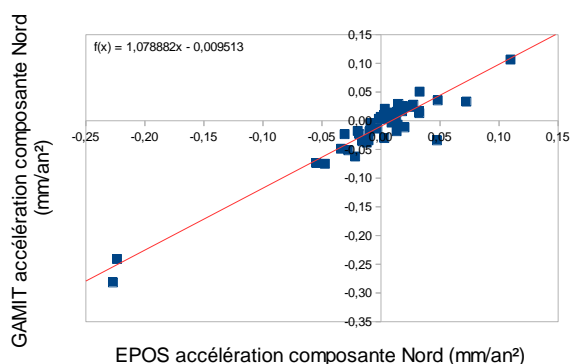


Figure 10 : Graphique des mouvements en accélération pour les solutions GAMIT et EPOS sur la composante Nord

Interprétation visuelle des données en accélération pour les solutions EPOS/SCRS : composante NORD

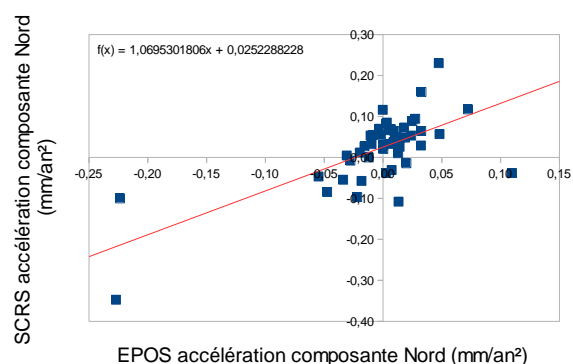


Figure 11 : Graphique des mouvements en accélération pour les solutions EPOS et SCRS sur la composante Nord

Les probabilités de l'existence d'une corrélation, déterminées avec la loi de Student sont très significatives, même pour les plus faibles. Elles apportent juste une information supplémentaire sur la précision de la comparaison entre les solutions et sur la précision des méthodes de traitement. La comparaison GAMIT/EPOS (CNRS/ISTerre) est très bonne contrairement à la comparaison SCRS/EPOS (INGV) qui allie l'utilisation de deux méthodes PPP moins précises.

III.3.4.2 Comparaison des mouvements en accélération des différentes solutions

Après avoir comparé les solutions entre elles, les valeurs issues des différentes solutions vont être comparées pour chaque station. Cette étude permet de dégager un classement en fonction de la concordance des résultats au travers des quatre solutions. Ainsi l'étude met en avant les stations pour lesquelles on retrouve les mêmes termes en accélération sur les composantes Nord, Est et Up avec toutes les solutions. Dans cette

partie EPOS1 représentera la solution EPOS (CNRS-ISTerre) et EPOS2 la solution EPOS (INGV). Deux méthodes sont utilisées pour comparer les données :

- Calcul n°1

Le calcul se fait à partir des deltas des mouvements en accélération entre les quatre solutions pour chaque composante. Exemple avec la composante Nord :

$$\Delta 1 = \sqrt{\Delta Na1^2 + \Delta Na2^2 + \Delta Na3^2 + \Delta Na4^2 + \Delta Na5^2 + \Delta Na6^2}$$

$$\text{Ou : } \Delta Na1 = \Delta Na|EPOS1 - GAMIT|, \Delta Na2 = \Delta Na|EPOS1 - SCRS| \dots$$

Après obtention des trois deltas ($\Delta 1$ composante Nord, $\Delta 2$ composante Est et $\Delta 3$ composante Up), on détermine le vecteur qui les sépare pour classer les stations avec :

$$D = \sqrt{\Delta 1^2 + \Delta 2^2 + \Delta 3^2}$$

- Calcul n°2

Le calcul se fait à partir de l'écart entre la moyenne des deltas de l'accélération entre les quatre solutions et des deltas de l'accélération entre les quatre solutions pour chaque composante. Exemple avec la composante Nord :

$$E1 = M1 - \Delta Na1, E2 = M1 - \Delta Na2 \dots E6 = M1 - \Delta Na6$$

Ou :

$$M1 = \text{Moyenne}(\Delta Na1, \Delta Na2, \Delta Na3, \Delta Na4, \Delta Na5, \Delta Na6)$$

Après obtention de tous les écarts, on détermine le vecteur qui les sépare :

$$D_N = \sqrt{E1^2 + E2^2 + E3^2 + E4^2 + E5^2 + E6^2}$$

On fait de même, de façon à obtenir D_E pour la composante Est et D_Up pour la composante Up. Puis, on classe ces données de cette façon :

$$D = \sqrt{D_N^2 + D_E^2 + D_Up^2}$$

On obtient deux classements des stations qui sont présentés en annexe 6.

Ce classement permet d'identifier plus précisément les stations pour lesquelles la concordance des termes en accélération entre les différentes solutions n'est pas bonne. Le classement basé sur le calcul n°1 est sensible aux écarts entre les solutions alors que les résultats issus du calcul n°2 sont sensibles aux écarts mais par rapport à la moyenne des

termes en accélérations déterminées pour les quatre solutions. Pour la suite de l'analyse, on s'appuiera sur ce classement pour étudier des stations qui ont des mouvements transitoires intéressants, c'est-à-dire les stations avec les plus fortes accélérations (positives ou négatives), mais on étudiera aussi des stations sans accélération pour pouvoir les comparer à celles qui en ont. Les stations avec les plus grandes accélérations sont les stations issues de la solution GAMIT avec les termes les plus élevés/faibles, pour lesquelles on retrouve le même signe en accélération pour les 4 solutions. Quelques stations avec un signe contraire à la solution SCRS sont quand même conservées car les trois autres solutions vont dans le même sens (Annexe 7). Pour cette sélection, sont donc retenues toutes les accélérations avec un terme supérieur à 0,03 mm/an² pour les accélérations positives et -0,03 mm/an² pour les accélérations négatives.

Pour conclure cette partie, différentes analyses ont été réalisées sur les mouvements en accélération, la première en comparant les solutions par composantes, la deuxième en comparant directement les solutions entre elles et la troisième en réalisant une comparaison avec les stations. Ces trois comparaisons permettent de valider les mouvements en accélération que l'on a déterminé ainsi que d'affirmer que ces mouvements en accélérations ne proviennent pas d'un artefact d'une méthode de traitement.

IV Résultats

Cette partie vise à caractériser les mouvements transitoires (saisonniers/long terme), puis de réaliser dans un premier temps des comparaisons entre les modèles de surcharge hydrologique calculés par l'EOST et les séries temporelles des déplacements des stations du RENAG présentées dans les parties précédentes, tout d'abord sur une période annuelle et ensuite sur le long terme. Dans un second temps, on s'intéressera aux phénomènes locaux qui ne sont pas pris en compte par les modèles hydrologiques.

IV.1 Identification et caractérisation des signaux annuels par comparaison avec les modèles de surcharge

IV.1.1 Présentation et caractérisation des signaux annuels

Dans les signaux annuels des séries temporelles GPS, on trouve des déformations de la croûte terrestre sous forme de mouvements transitoires liés aux phénomènes de surcharges saisonnières atmosphériques, océaniques et hydrologiques (Fig.12).

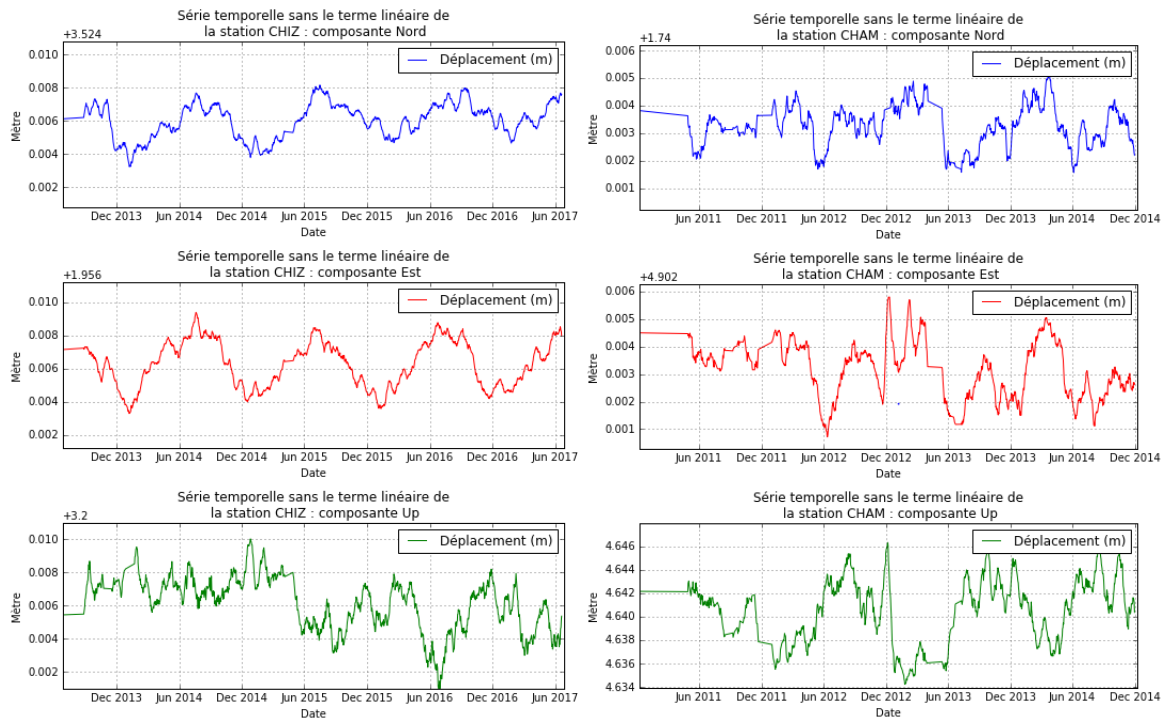


Figure 12 : Exemple de mouvements transitoires liés aux phénomènes de surcharges saisonnières avec les stations CHIZ et CHAM (solution GAMIT)

Nous nous intéressons principalement au phénomène de surcharge hydrologique car cet élément n'est pas pris en compte par les différents types de traitement des données. Les modèles hydrologiques seront comparés avec les résultats issus de la solution GAMIT car cette solution prend en compte des modèles pour corriger les effets des phénomènes de surcharge océanique et atmosphérique (ceci permettant d'enlever du bruit présent dans les mesures). De plus, les résultats de cette solution lors de leurs réalisations sont calculés avec l'utilisation de la double différence ; cette méthode est préférée à la méthode PPP pour des raisons de précisions. Le choix de cette solution résulte également de l'étude des facteurs de corrélation entre les accélérations des quatre solutions.

IV.1.2 Comparaison avec les modèles de surcharge

Pour étudier la caractérisation des signaux annuels, les déplacements des stations et les données issues des modèles de surcharge vont être comparés sur une période commune de quatre ans (les quatre dernières années communes d'observations). Après l'étude des différents modèles de surcharge calculés par l'EOST, on fait le choix de comparer les données GPS avec les modèles GLDAS2 et MERRA2_hyd dans le système de coordonnées Center of Figure (Annexe 4). Sur le plan horizontal, pour les composantes Nord et Est de l'ensemble des stations du RENAG, les valeurs de déformation élastique

due à la surcharge hydrologique sont comprises dans un intervalle allant de [-1.5 mm, +1.5 mm]. Pour la composante Up les valeurs sont comprises dans un intervalle allant de [-7 mm, +7 mm]. Les signaux sur les composantes horizontales sont plus faibles que pour la composante verticale car la surcharge hydrologique impacte principalement la composante Up. Exemple de la station ALPE :

- Pour la composante Nord (Fig. 13) :

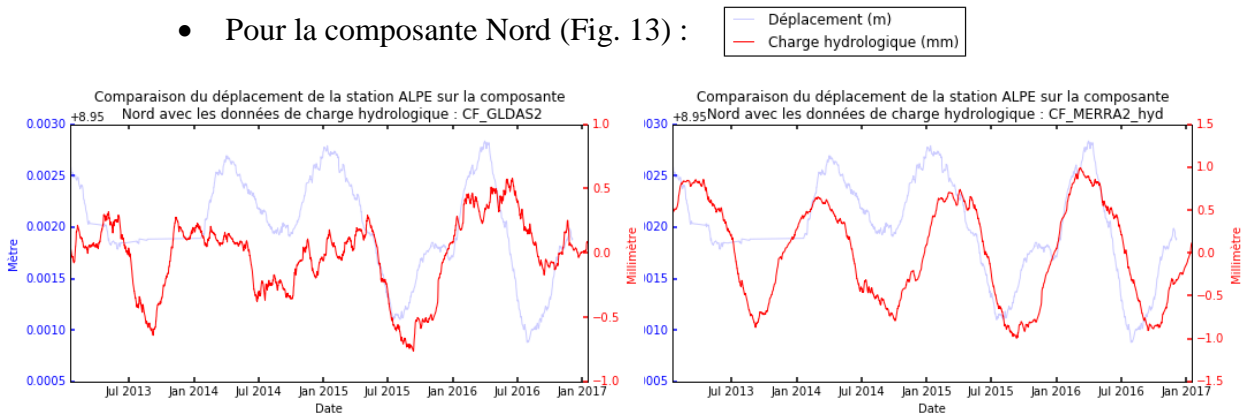


Figure 13 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Nord avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.

Les deux jeux de données sont en phase avec une période proche de 12 mois correspondant au cycle saisonnier. L'amplitude pour le déplacement nord-sud est d'environ 1,5 mm (3 mm pic à pic). Pour les données du modèle GLDAS2 l'amplitude est de 0,6 mm et pour le modèle MERRA2_hyd l'amplitude est de 1 mm. Pour superposer les séries temporelles dans les Fig. 13 à 15, les échelles des modèles ont été adaptées.

- Pour la composante Est (Fig. 14) :

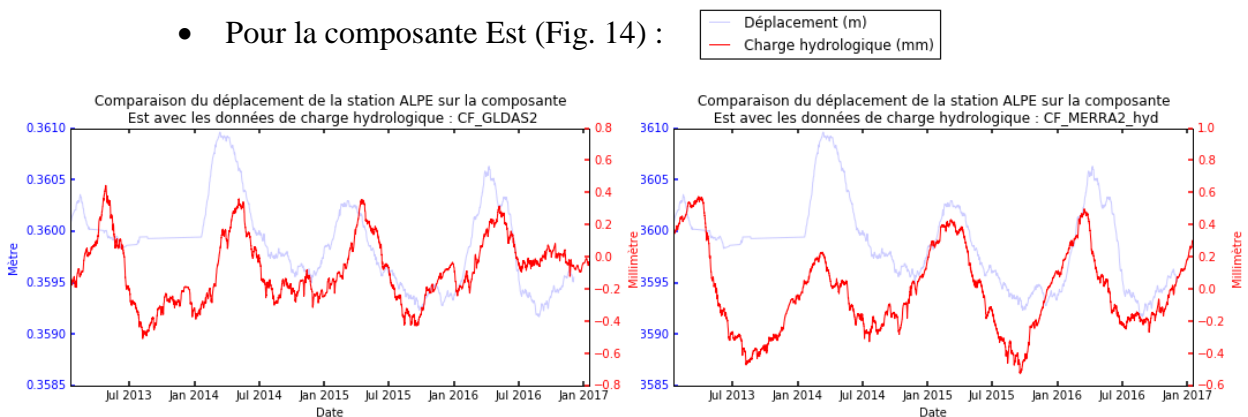


Figure 14 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Est avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.

Pour cette composante Est, l'amplitude du déplacement observé est de 1,5 mm, pour le modèle GLDAS2 de 0,4 mm et pour le modèle MERRA2_hyd elle est de 0,5 mm.

- Pour la composante Up (Fig. 15) :

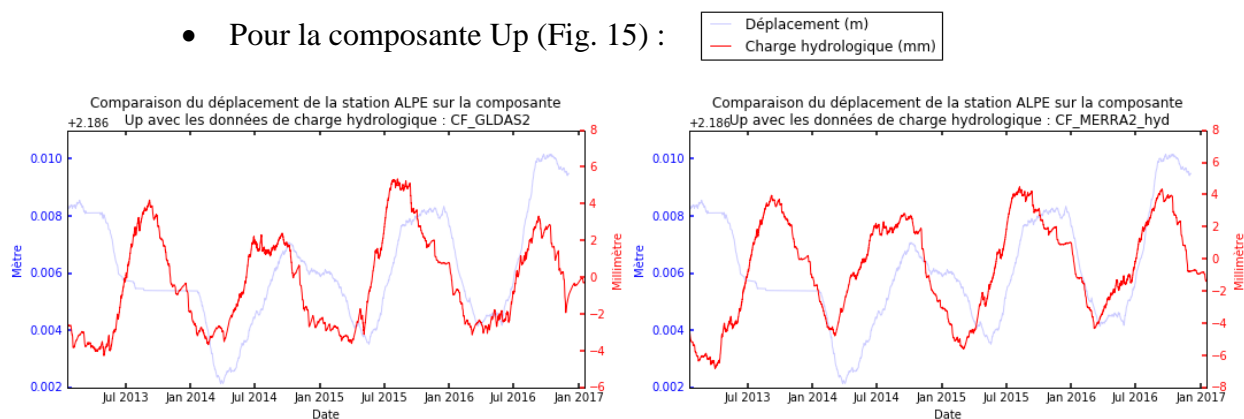


Figure 15 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Up avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.

L'amplitude du déplacement observé est de 4,5 mm, pour le modèle GLDAS2 de 4 mm et pour le modèle MERRA2_hyd de 5 mm.

Cette comparaison visuelle permet de classer les résultats dans 4 catégories :

- Corrélation : les pics du modèle correspondent bien aux pics présents dans la série temporelle représentant le déplacement de la station et une phase similaire (Fig. 16).

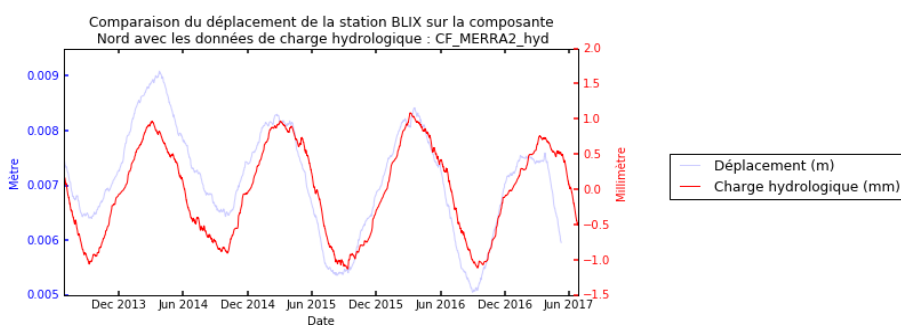


Figure 16 : Comparaison du déplacement de la station BLIX pour la composante Nord avec la charge hydrologique MERRA2_hyd (solution GAMIT)

- Anti-corrélation : le modèle est inversé par rapport au déplacement. Il y a donc une anti-corrélation entre les données du modèle et le déplacement observé (Fig. 17).

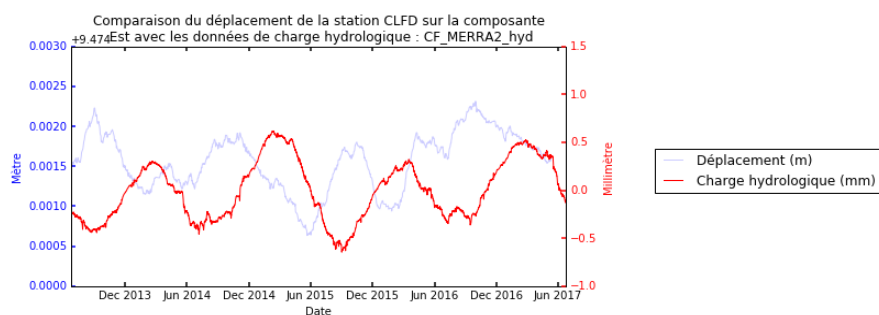


Figure 17 : Comparaison du déplacement de la station CLFD pour la composante Est avec la charge hydrologique MERRA2_hyd (solution GAMIT)

- Déphasage : dans ce cas, on observe un déphasage d'environ 3 mois entre les données de surcharge et le déplacement de la station (Fig. 18).

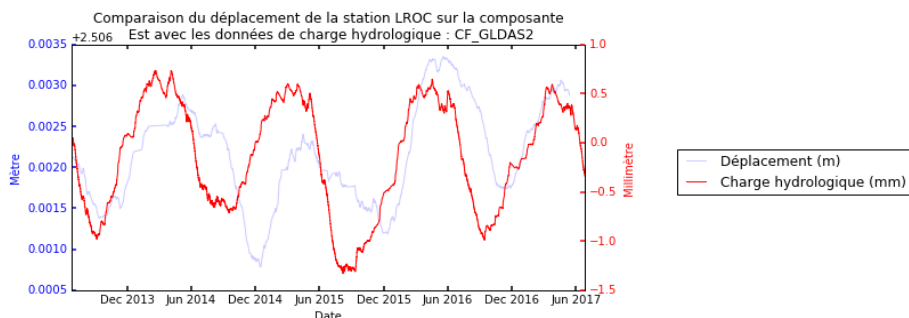


Figure 18 : Comparaison du déplacement de la station LROC pour la composante Est avec la charge hydrologique GLDAS2 (solution GAMIT)

- Pas de cohérence : dans ce cas, il ne semble pas y avoir de cohérence entre les données de charge et les déplacements (Fig. 19).

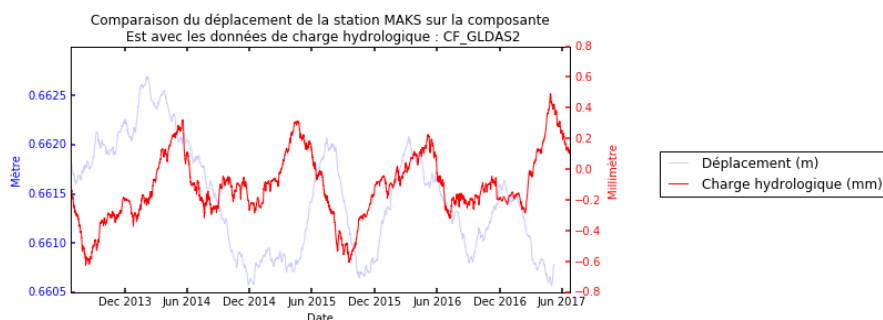


Figure 19 : Comparaison du déplacement de la station MAK5 pour la composante Est avec la charge hydrologique GLDAS2 (solution GAMIT)

Toutes les stations sont classifiées au travers de ces quatre catégories (Annexe. 8). D'autres résultats graphiques à titre d'exemples sont disponible en Annexe 9.

Lors de cette étude, on se rend compte que dans certains cas, le modèle GLDAS2 correspond mieux aux déplacements que le modèle MERRA2_hyd et dans d'autres cas c'est l'inverse. En effet, ces deux modèles n'étant pas réalisés de la même façon, avec des paramètres et des représentations différentes (Annexe 4), ils ne sont pas totalement similaires, cependant on retrouve bien la présence des mêmes pics saisonniers. En termes d'amplitude, les modèles de surcharge hydrologique sont cohérents avec les signaux transitoires saisonniers observés pour la composante verticale. Cependant, pour les composantes horizontales, les modèles sont clairement sous-dimensionnés.

On ne retrouve pas un modèle de surcharge permettant d'expliquer la modélisation de l'ensemble des signaux saisonniers provenant des stations du RENAG. La correspondance du comportement de certaines stations avec un certain modèle doit être reliée aux caractéristiques hydrologiques du site, donc probablement à un effet local alors

que les modèles sont régionaux (c'est pour cela que tous les modèles ne sont pas cohérents avec les déplacements des stations). C'est pour cette raison (parce qu'il n'y a pas de modèle unique/déterminé pour une région proche aux stations) que la surcharge hydrologique n'est pas encore modélisée lors des calculs de positionnement GPS, au contraire des surcharges océaniques et atmosphériques.

IV.2 Identification et caractérisation des signaux long terme (forme, amplitude, répartition spatiale)

IV.2.1 Identification et caractérisation des signaux long terme

Dès lors qu'on étudie les déplacements des stations sur une période plus longue, d'autres mouvements transitoires apparaissent. Ces mouvements ne sont pas réguliers comme les mouvements transitoires liés aux phénomènes saisonniers et ne sont pas présents pour toutes les stations. La principale difficulté pour les observer est qu'ils nécessitent des mesures ininterrompues sur une période supérieure à 5 ans pour qu'ils se dessinent. Ce sont ces mouvements dont on cherche à déterminer l'origine.

Exemple de mouvement transitoire long terme avec la station WLBH (Fig. 20) :

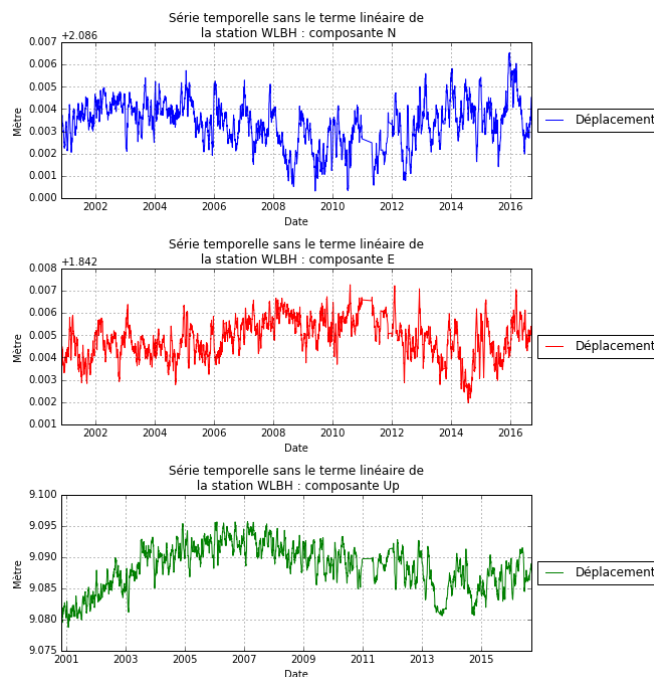


Figure 20: Exemple de mouvement transitoire long terme avec la station WLBH (solution GAMIT)

Les mouvements transitoires long terme n'impactent pas seulement la composante Up, ils touchent aussi les données sur les composantes Nord et Est mais avec un impact moindre. Dans l'exemple présenté en Fig. 20, pour la composante Up les variations se font

dans un intervalle de 15 mm alors que pour les composantes Nord et Est les données varient dans un intervalle de 6 mm.

IV.2.2 Comparaison avec les modèles de surcharge

Il est possible de comparer les données de charge hydrologique sur un cycle annuel, cependant on remarque très rapidement que lorsqu'on étudie des données sur une plus longue période d'observation avec des mouvements transitoires (long terme) on ne retrouve pas de variations dans les données issues des modèles de charge hydrologique qui pourraient expliquer ces mouvements.

Exemple avec la station WLBH (Fig. 21) :

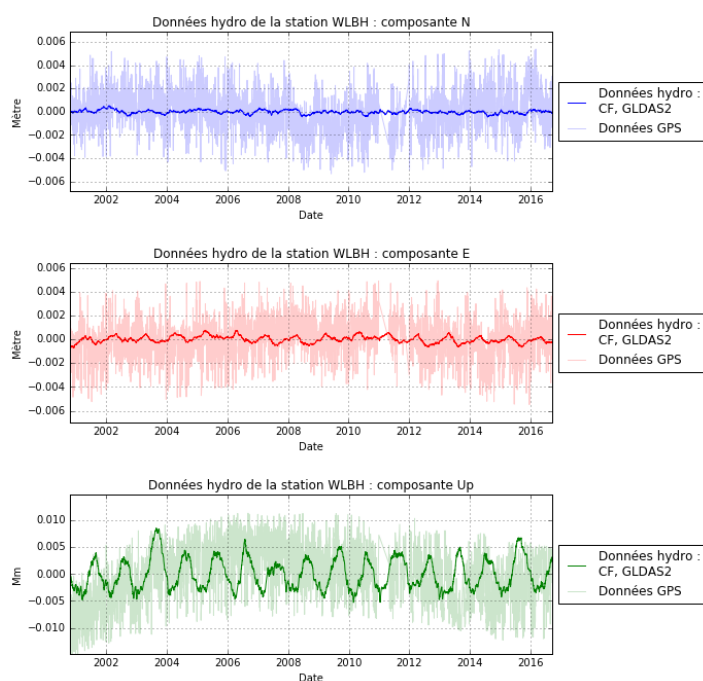


Figure 21 : Comparaison du déplacement de la station WLBH avec la charge hydrologique GLDAS2 sur une longue période d'acquisition (solution GAMIT)

Les modèles hydrologiques ne permettent pas d'expliquer la présence des mouvements transitoires long terme car ils ne comportent pas de tendance long terme. Il faut donc trouver des séries de mesures plutôt que des modèles pour analyser les mouvements transitoires long terme. Nous avons déjà vu que l'impact de la surcharge hydrologique peut être à très petite échelle et peut provenir de différents phénomènes locaux tels que la géologie/hydrologie du site, les précipitations locales... On s'intéressera alors à des observations et mesures de ces différents phénomènes pour essayer d'expliquer ces mouvements.

IV.3 Identification de phénomènes locaux

L'objectif est d'essayer d'identifier les phénomènes de surcharges qui jouent sur les déplacements des stations long terme. À l'échelle locale, différents éléments peuvent intervenir sur la création de ces mouvements. Pour cela, différents jeux de données seront mis en relation afin de proposer une interprétation des mouvements transitoires observés.

IV.3.1 Présentation des données

IV.3.1.1 Données hydrographiques

Les données hydrographiques identifient les cours d'eau/surfaces d'eau pour voir si des éléments à proximité des stations peuvent influencer les positions GNSS sur le long terme avec une réponse élastique ou la théorie de la poroélasticité. Les données utilisées sont celles fournies par l'IGN : BD TOPO® Hydrographie. Ces données contiennent les cours d'eau, les surfaces d'eau, les réservoirs et autres points d'eau au format SHP (Shapefile) (Annexe 10).

IV.3.1.2 Données géologiques

Elles visent à rechercher si le type de sol peut avoir une influence sur ces mouvements en identifiant les différents types de sols sous les stations GNSS. Ainsi, on peut étudier comment ces sols se comportent sur les sites des stations. On peut alors vérifier si les sols sont stables (exemple : présence de sable pour les sols moins stables et de granit pour les plus stables) et leur comportement avec les précipitations (exemple : gonflement des sols en présence de sols argileux : théorie de la poroélasticité). Les données utilisées sont celles fournies par le BRGM comportant la carte géologique de la France métropolitaine à l'échelle 1/1 000 000 (Annexe 11).

IV.3.1.3 Données piézométriques

Ces données ont pour objectif d'étudier la circulation des fluides en profondeur avec des mesures du niveau de la surface de la nappe d'eau souterraine. Les piézomètres peuvent être installés soit par le biais d'un puits ou d'un forage soit par le biais d'un accès naturel tel qu'une grotte. Ces données représentant les déformations locales, seules les données piézométriques proches des stations du RENAG seront retenues pour voir une potentielle relation avec les mouvements transitoires observés. Les données piézométriques sont disponibles en libre téléchargement sur le site Ades.eau.france pour 3780 points de mesures au format CSV (Voir annexe 10).

IV.3.1.4 Relief

Les données de relief sont utilisées pour identifier la topographie des sites où se situent les stations du RENAG. L'objectif est d'identifier si la station se situe sur un sol en pente pour voir si celle-ci pourrait avoir une influence sur les mouvements en accélérations horizontales (Nord et Est).

Ces données (BD ALTI®) sont disponibles sur le site de l'IGN dans le système de projection Lambert-93. Les données récupérées sont sous forme de MNT avec une résolution spatiale de 25 mètres (données diffusées sous forme de grilles). On se sert de ces données pour réaliser des coupes et déterminer des pentes en pourcentage (Voir annexe 12).

IV.3.1.5 Données météorologiques

Les données météorologiques seront comparées directement avec les séries temporelles pour identifier quels paramètres peuvent influencer les déplacements des stations. Seules les stations météo proches des stations du RENAG seront conservées dans l'analyse, car des informations locales sont recherchées pour mettre à jour une influence sur les données GPS.

Deux types de données météo sont utilisées. Les premières sont les données météorologiques diffusées au format CSV par le site Météo France. Les enregistrements des données vont du 1er janvier 2010 jusqu'à fin 2018 pour une soixantaine de stations météo en France. Ces données comportent des mesures de pression, température, humidité, hauteur de neige ainsi que les précipitations (Annexe 13). Ces stations ne vont pas toutes être utilisées, seules celles qui sont proches des stations du RENAG seront conservées.

Le second type de données météorologiques, sont des données extraites de stations météo proches des stations du RENAG sur le Sud Est de la France par KARBOU F. Directrice de Recherche Développement Durable au centre Météo-France/CNRS de Grenoble (Fig. 22). Ces données sont au format .dat, elles contiennent pour chaque station du RENAG des données pouvant être issues de 3 stations météo proches avec des mesures horaires de température, précipitation et humidité pour certaines. Les enregistrements des données vont du 1^{er} janvier 2000 au 1^{er} janvier 2019.

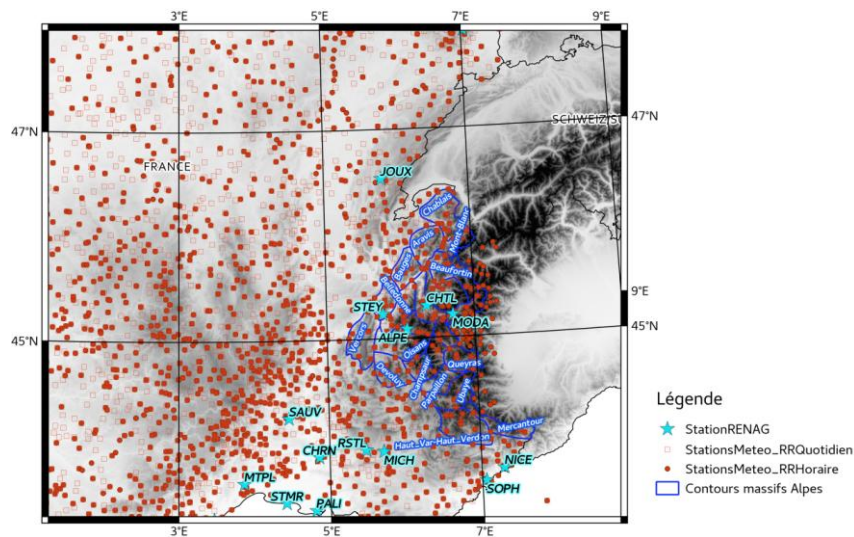


Figure 22 : Localisation des stations météo

IV.3.1.6 Données GLIMS

Elles vont permettre d'identifier les stations du RENAG proches des glaciers. Car la fonte des glaces joue un rôle important sur le phénomène de surcharge hydrologique. En effet, la fonte des glaces entraîne une diminution de la masse de glace qui permet une surrection du sol. Cette diminution de masse modifie l'équilibre isostatique, c'est ce qui entraîne le déplacement de la croûte terrestre.

Ces données sont disponibles au format SHP sur le site : International GLIMS community and the National Snow and Ice Data Center. Elles représentent les contours des glaciers et des régions des lacs glaciaires sous forme de polygones (Voir annexe 14). Seule la position des stations par rapport aux glaciers pourra être étudiée car on ne dispose pas de l'information concernant l'évolution des glaciers au cours du temps, mais, généralement, leur masse diminue lors des 20 dernières années couvertes par les mesures GPS.

IV.3.1.7 Failles

Ces données visent à identifier les stations du RENAG proches des failles. Les données utilisées sont celles fournies par le BRGM. Les failles sont représentées par des lignes au format SHP (Voir annexe 15).

Une faille est une zone de rupture sur laquelle deux blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ce déplacement est dû aux contraintes induites par le déplacement tectoniques des plaques.

Trois types de déplacements sont possibles (Fig. 23) :

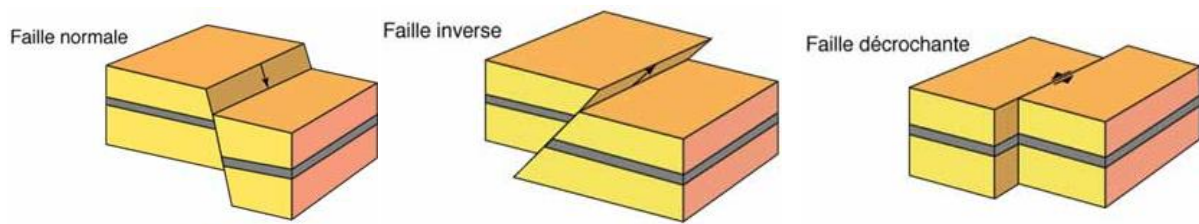


Figure 23 : Schéma des différents déplacements possibles en présence de faille⁷

On s'intéresse aux failles car elles jouent un rôle majeur dans la circulation des eaux souterraines. Ce sont des zones qui peuvent contenir de l'eau et où l'eau peut circuler. Elles peuvent aussi délimiter deux blocs tectoniques de géologie différente. De plus, elles jouent également un rôle sur la déformation de la croûte terrestre avec le chargement tectonique des failles.

IV.3.2 Interprétation des résultats

La première étude consiste à regarder la répartition spatiale des stations en fonction des valeurs des accélérations déterminées dans la partie III.3.3.3 Test 3. Des cartes sont réalisées selon les trois axes de direction Nord/Sud, Est/Ouest et Up/Down dans lesquelles les accélérations sont classées en fonction de leurs valeurs, mais aussi de leurs directions (signe : accélération positive et négative) (Annexe 16). Ces cartes permettent de voir que les valeurs des accélérations ainsi que les directions ne sont pas regroupées par zone. En effet, il ne semble pas y avoir de concordance même pour des stations qui sont relativement proches (exemple : pour les stations SOPH et NICE distantes l'une de l'autre d'environ 20 km ; les mouvements sur les composantes Nord-Sud et Est-Ouest sont de sens contraire).

L'hypothèse suivante est alors proposée : les phénomènes qui influencent les valeurs/directions des accélérations interviennent sur des zones très proches des stations. Pour cela, dans les parties suivantes les phénomènes pouvant influencer les stations seront étudiés à échelle locale (les caractéristiques des sols, les enregistrements météo... les plus proches possible des stations) afin d'essayer d'en dégager des corrélations.

Des analyses vont être réalisées sur deux plans différents pour les hypothèses émises par la suite : sur le plan horizontal avec la réalisation d'une analyse du déplacement et des valeurs des accélérations des stations (composantes Nord et Est) et sur le plan

⁷ <http://sagascience.cnrs.fr/dosgeol/glossaire/Images/failNorm.html>

vertical avec une étude des signaux transitoires et des termes en accélération (composante Up). Dans les parties suivantes, des résultats vont être présentés pour quelques stations, des tableaux généraux (Annexe 17, 18 et 19) vont reprendre les résultats de l'ensemble des hypothèses pour toutes les stations.

Pour le plan horizontal, on va s'intéresser aux valeurs des accélérations ainsi qu'aux déplacements 2D des stations. Pour l'étude des déplacements 2D, des graphes sont réalisés pour chaque station avec en abscisse les déplacements issus de la composante Est et en ordonnée les déplacements issus de la composante Nord. Ces graphes représentent surtout la variabilité annuelle du déplacement, les non-linéarités étant souvent faibles par rapport au signal annuel. Ils vont permettre de voir si une direction se dégage lors des déplacements annuels des stations. L'analyse de ces données permet d'obtenir des directions pour certaines stations (Fig. 24) où le déplacement issu des composantes Nord et Est donne une orientation, contrairement à d'autres stations (Fig. 25) pour lesquelles l'ensemble des points sont regroupés ; dans ce cas-là, aucune direction n'apparaît.

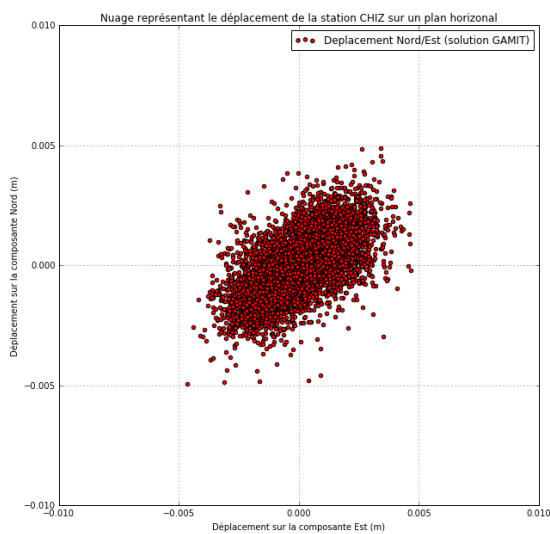


Figure 24 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CHIZ

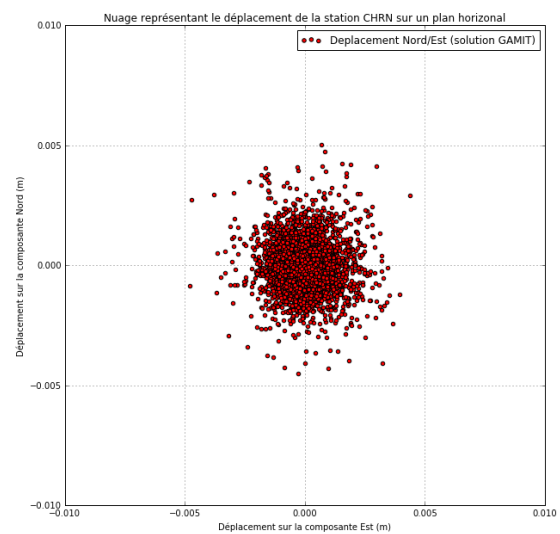


Figure 25 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CHRN

Pour la station CHRN (Fig. 25) on ne remarque pas de direction en particulier, le déplacement horizontal de la station ne semble pas influencé ; la direction de l'accélération horizontale (étude long terme) reflète également ce résultat par sa faible amplitude (Fig 27). Avec la station CHIZ (Fig. 24) la direction Nord-Est / Sud-Ouest se dégage. La direction d'accélération horizontale (Fig. 26), purement Nord mais de faible amplitude dans ce cas, ne corrobore pas le déplacement 2D saisonnier de la station. Dans ce cas, les mouvements horizontaux (liés aux phénomènes saisonniers) ne vont pas influencer les termes en accélérations.

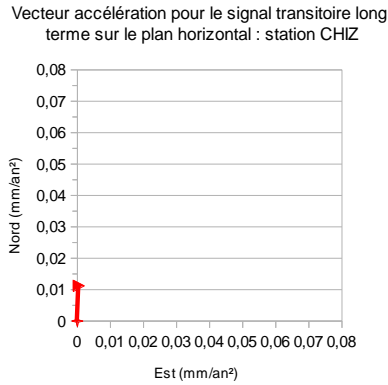


Figure 26 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CHIZ (c.f. Annexe 17)

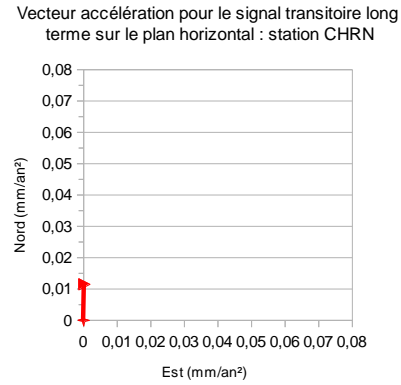


Figure 27 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CHRN (c.f. Annexe 17)

Pour l'étude des déplacements sur le plan vertical on s'intéresse aux séries temporelles avec les graphes comportant le déplacement des stations réalisées sur la composante verticale ainsi qu'aux termes en accélérations déterminés dans la partie III.3.3 Test 3. Pour la station CHIZ (Fig. 28) il n'y a pas d'accélération significative sur la composante verticale mais on observe quand même les variations liées aux phénomènes saisonniers. La station CHRN (Fig. 29) dispose d'une accélération significative sur la composante verticale sur le long terme.

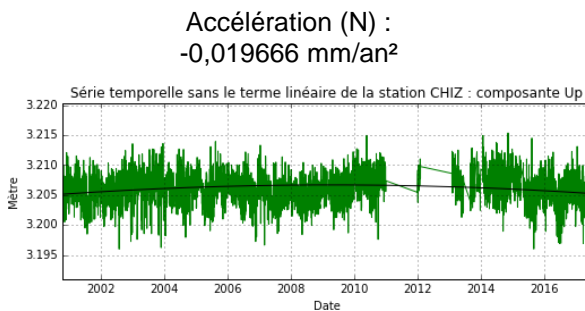


Figure 28 : Série temporelle sans le terme linéaire station CHIZ (Up)

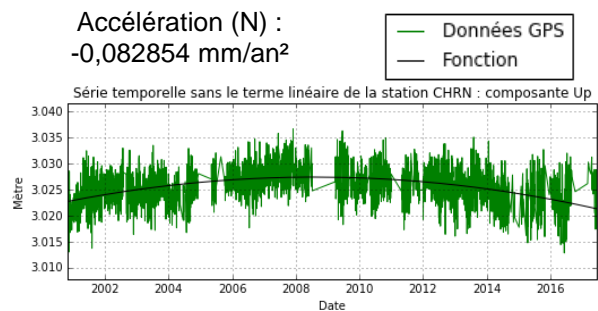


Figure 29 : Série temporelle sans le terme linéaire station CHRN (Up)

L'étude des déplacements 3D des stations et des termes en accélérations reliés vise à identifier ce qui engendre les déplacements des stations. En effet, ces résultats peuvent amener des éléments de réponses sur ce qui génère les signaux transitoires que l'on retrouve dans les séries temporelles des stations. Différents éléments vont être étudiés avec une influence principalement sur la composante verticale tel que : le type de sol, le relief, les enregistrements de températures et de précipitation, la proximité avec les données hydrographiques, les failles et les glaciers/région de lac glaciaire.

IV.3.2.1 Hypothèse 1 : influence de la géologie locale

La géologie du site peut avoir une influence en fonction de la composition du sol. Il est nécessaire de connaître le type de sol à l'emplacement d'une station, car la réaction ne sera pas la même pour toutes les stations. En effet, on ne retrouvera pas la même réponse suite à des déformations si le sol est poreux, rigide, perméable ... Les types de sols sont recensés pour toutes les stations dans le tableau en annexe 18. En plus d'étudier la géologie à l'emplacement de la station on s'intéresse également aux variations géologiques proches dans un rayon de 500 mètres autour de la station. Ces variations semblent pouvoir affecter le déplacement 2D des stations, exemple avec les stations CHIZ et MODA.

La station CHIZ a un mouvement saisonnier dans une direction Nord-Est/Sud-Ouest (Fig. 24) sur le plan horizontal. Elle se situe sur un sol composé de sables, de cailloutis et d'argiles. Une variation géologique semble correspondre à la direction donnée par le déplacement 2D de la station (Fig. 30), elle se situe 110 m au Nord-Est avec un sol composé de calcaires et de marnes. Cependant comme vu précédemment, les mouvements horizontaux n'influencent pas les termes en accélérations (Fig. 26). Dans ce cas la variation géologique proche semble influencer juste les signaux transitoires saisonniers.



Figure 30 : Extrait de la carte géologique de la station CHIZ (Annexe 11)

Station MODA : on identifie une direction Nord-Ouest/Sud-Est (Fig. 31) sur le plan horizontal. Elle se situe sur un sol composé de quartzites, conglomérats et de schistes. Une variation géologique semble correspondre à la direction donnée par le déplacement 2D de la station (Fig.32), elle se situe 80 m au Sud avec un sol composé de calcaires, d'évaporites et de dolomies. Cette direction est validée par le vecteur qui représente la direction de l'accélération horizontale sur long terme (Fig. 33). Il est alors possible que la variation géologique proche influence des signaux transitoires long terme.

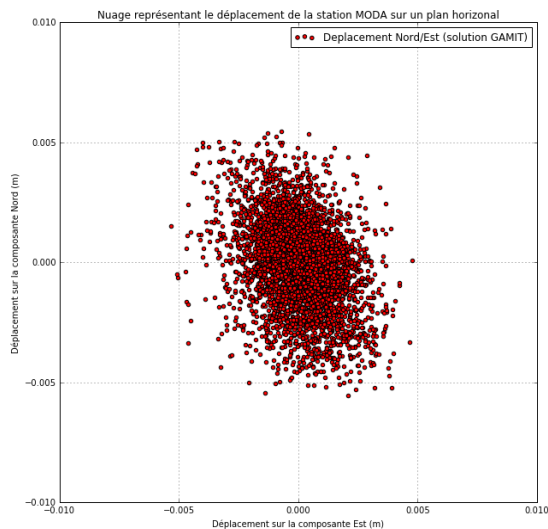


Figure 31 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station MODA



Figure 32 : Extrait de la carte géologique de la station MODA (Annexe 11)

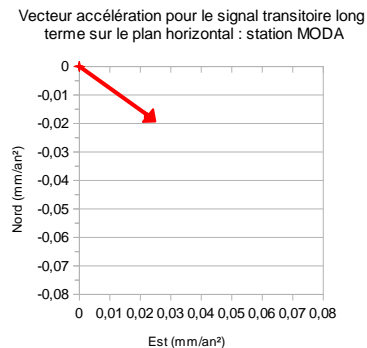


Figure 33 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station MODA

Les variations géologiques semblent pouvoir influencer une direction dans les déplacements (composantes Nord et Est) pour certaines stations sous l'exercice d'un phénomène saisonnier. Les phénomènes pouvant générer ces variations vont être étudiés par la suite.

Il est également intéressant de regarder le type de sol, notamment dans le cas d'une anti-corrélation avec les modèles de surcharges hydrologiques sur la composante verticale (Annexe 8). Les modèles de surcharges sont réalisés en prenant en compte seulement la réponse élastique de la Terre et non la théorie de la poroélasticité. On regarde alors la géologie des stations pour lesquelles on obtient une anti-corrélation validée par les modèles GLDAS2 et MERRA2_hyd sur la composante verticale (Tab. 12).

Station	Géologie	Roches	Sol poreux
AGDE	basanites, hawaïtes, benmoréites, téphrites	Roches Magmatiques	X
AUBU	sables, cailloutis, argiles	Roches Sédimentaires	✓
CHIZ	marnes, calcaires, conglomérats, grès		X
FCLZ	sables, argiles, graviers, galets		✓
WLBH	diorites, gabbros	Roches Plutoniques	X

Tableau 12 : Géologie des sols pour les stations anti corrélées avec les modèles de surcharge hydrologique

Cinq stations se dégagent avec des réponses possibles selon la théorie de la poroélasticité. Pour les stations AUBU - FCLZ la géologie semble favoriser ce phénomène.

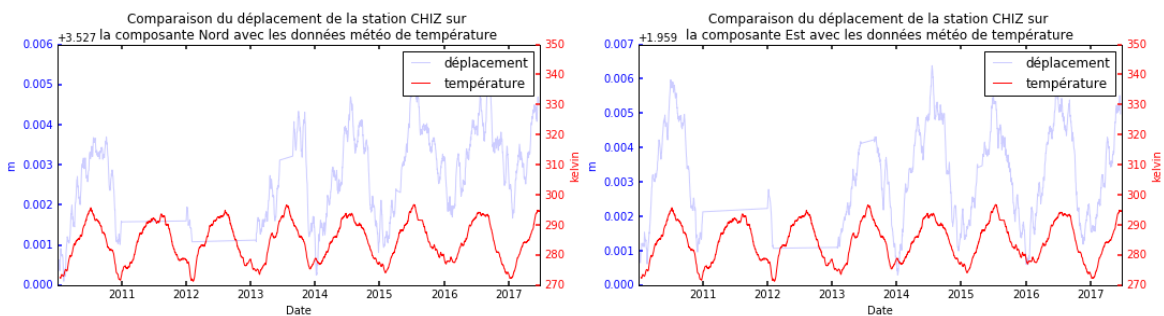
IV.3.2.2 Hypothèse 2 : influence des températures

Pour toutes les stations, des corrélations sont réalisées avec des enregistrements de données de températures avec des stations météo locales (les plus proches possibles).

Station MODA : on ne trouve aucune corrélation entre les jeux de données. Les coefficients de corrélation sont : -0.19 pour la composante Nord et -0.10 pour la composante Est en comparaison avec l'évolution des températures.

Station CHIZ : pour cette station, il y a une corrélation entre les déplacements sur les composantes Nord - Est et les données de température avec des coefficients de corrélation respectivement de 0.66 et de 0.69 (Fig. 34) en comparaison avec l'évolution des températures. Dans ce cas présent, il est possible que le phénomène qui agit sur les variations locales du sol proche de la station CHIZ et qui ait induit les déplacements horizontaux soit l'évolution des températures.

Figure 34 : Graphe de comparaison entre les données de température et de déplacement pour la station CHIZ



Corrélation température / déplacement (station CHIZ composante Nord)

Corrélation température / déplacement (station CHIZ composante Nord)

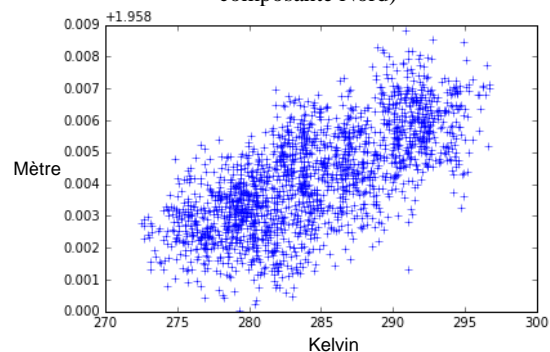
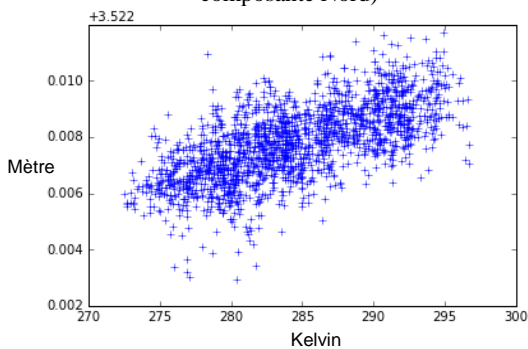


Figure 35 : Graphe de la corrélation Température / Déplacement (m) pour la station CHIZ (composante Nord)

Figure 36 : Graphe de la corrélation Température / Déplacement (m) pour la station CHIZ (composante Est)

Les données de températures peuvent permettre d'expliquer les signaux transitoires saisonniers présents dans les séries temporelles de certaines stations (Fig. 35 et 36). Cependant elles ne semblent pas donner d'informations pour une étude des signaux transitoires long terme.

IV.3.2.3 Hypothèse 3 : Influence des surfaces d'eau/cours d'eau

Le déplacement 2D des stations est également étudié en lien avec les données hydrographiques dans lesquelles on retrouve cours d'eau et surface d'eau. En effet, en lien avec la réponse élastique de la Terre au phénomène de surcharge, le déplacement des stations peut être dû aux variations de hauteur d'eau de lac ou autres surfaces d'eau.

Station ROSD :

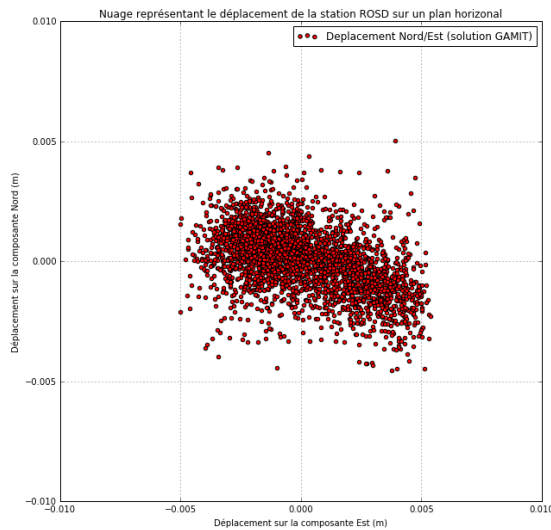


Figure 37 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station ROSD



Figure 38 : Extrait de la carte hydrographique de la station ROSD (Annexe 10)

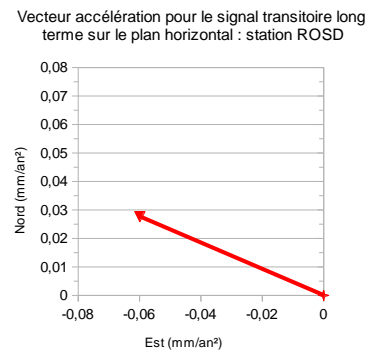
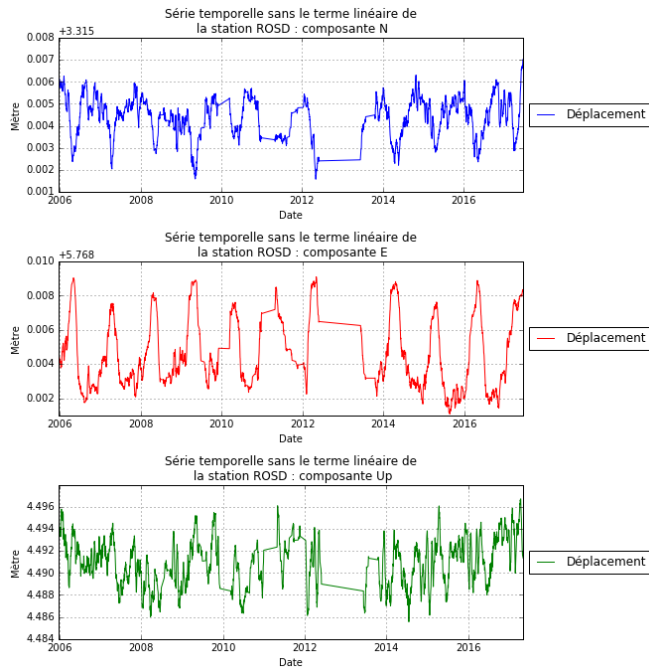


Figure 39 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station ROSD

Le déplacement de cette station (Fig. 37) identifie un déplacement horizontal du Nord-Ouest au Sud-Est. La direction semble pouvoir être expliquée par la présence du Lac de Roselend situé 240 mètres à l'Est de la station (Fig. 38). Cette direction est confortée par le vecteur qui représente la direction de l'accélération horizontale (Fig. 39) sur le long terme. Il est alors possible que les signaux transitoires soient dus à la proximité du lac.

L'hydrologie étant un candidat potentiel pour les signaux transitoires longs termes, on va étudier les termes en accélération pour la station ROSD (car elle se situe à 240 m d'une grande surface d'eau). Cette station dispose sur les composantes Est et Up de deux accélérations (Tab. 13) qui font d'après l'annexe 2 parties des plus fortes accélérations validées par les trois autres solutions. Avec des accélérations de -0.060 mm/an^2 et 0.060 mm/an^2 sur les composantes Est et Up, il semble possible que les grandes surfaces d'eau proches des stations puissent en fonction des hauteurs d'eau engendrer des signaux transitoires long terme.



	Accélération (mm/an ²)
Nord	0,028
Est	-0,060
Up	0,060

Tableau 13 : Valeurs des accélérations pour la station ROSD

Figure 40 : Série temporelle de la station ROSD sans le terme linéaire

D'autres stations proches de grandes surfaces d'eau sont également étudiées, cependant on n'observe pas les mêmes résultats.

Station NICE : les grandes surfaces d'eau telles que les mers et océans ne semblent pas avoir la même influence sur le déplacement des stations. Le graphe du déplacement 2D de la station NICE (Fig. 41) ne donne aucune direction. Or elle se situe à 2,5 km de la Mer Méditerranée (Fig. 42). Mais la distance entre surface d'eau et site géodésique est plus grande et les variations de niveau d'eau probablement plus faibles.

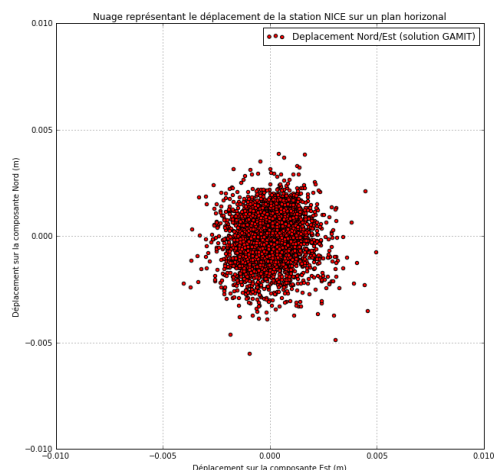


Figure 41 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station NICE



Figure 42 : Extrait de la carte hydrographique de la station NICE (Annexe 10)

Station FCLZ : elle se situe 7 km à l'Est du lac du Bourget. La distance séparant le lac de la station est beaucoup plus élevée que pour la station ROSD. Dans ce cas le graphe du déplacement 2D de la station FCLZ (Fig. 43) semble donner une direction très faible qui pointe vers le lac (Fig. 44). Ici aussi, les variations du niveau d'eau du lac sont probablement plus faibles qu'au lac de Roselend.

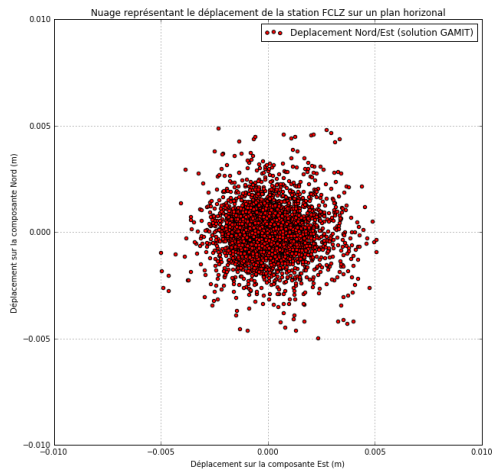


Figure 43 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station FCLZ



Figure 44 : Extrait de la carte hydrographique de la station FCLZ (Annexe 10)

Les variations de hauteur d'eau peuvent entraîner des redistributions de masse qui vont induire des surcharges et entraîner des déformations élastiques de la croûte terrestre. Ce type de surcharge intervient principalement sur une échelle annuelle, car elle provient des variations saisonnières (précipitations, fonte des neiges ...); dans le cas présent il semble possible qu'elle influence les signaux transitoires long terme. Les données hydrographiques peuvent permettre d'expliquer les déplacements horizontaux que l'on trouve avec des impacts plus ou moins importants en fonction de la distance qui sépare la surface d'eau de la station, et de la variation du niveau d'eau.

IV.3.2.4 Hypothèse 4 : Influence des failles proches

La proximité des failles est étudiée en lien avec la position des stations. Les failles peuvent engendrer différents types de déplacement selon si elles sont normales, inversées ou décrochantes. Les failles normales et inversées auront une influence sur le déplacement vertical de la station alors qu'une faille décrochante aura une incidence sur le déplacement horizontal.

La direction issue de l'analyse des déplacements 2D des stations pour la station CHIZ (Fig. 32) correspond à la position d'une faille située 1 km au Sud-Ouest (Fig. 45). Précédemment, pour cette station une hypothèse mêlant la typologie du sol et l'évolution

des températures a été établie. Cependant il est également possible que le déplacement 2D de cette station soit également justifié par la présence d'une faille. En effet, la direction du déplacement horizontal de la station pointe vers une faille. Les failles définissent généralement une limite entre les matériaux, il est alors possible que l'effet température joue à travers cette faille.



Figure 45 : Extrait de la carte répartition spatiale des failles de la station CHIZ (Annexe 15)



Figure 46 : Extrait de la carte répartition spatiale des failles de la station MODA (Annexe 15)

De même pour la station MODA, le déplacement horizontal de la station (Fig. 30) pointe vers une faille (Fig. 46). Pour être plus précis, la faille correspond à la variation géologique du site vue dans la partie VI.3.2.1. Pour cette station la corrélation avec les données de température n'avait pas pu être établie. Il est alors possible que le déplacement 2D de cette station provienne de la faille ou d'un autre paramètre environnemental.

D'après les termes en accélération, pour la station CHIZ (Tab. 14), si la faille a une influence sur le déplacement 2D de la station, cela ne se retrouve pas dans les termes en accélération. Ces valeurs sont très faibles contrairement à l'accélération de la station MODA (Tab. 15) sur la composante Up qui a une valeur de $-0,051 \text{ mm/an}^2$. Pour cette station, la faille pourrait être le phénomène qui engendre des signaux transitoires avec une influence uniquement sur la composante verticale. MODA est également une des stations au cœur des Alpes occidentales avec la plus forte surrection (presque 2 mm/an) dont l'origine n'est pas encore bien déterminée. Cette décélération pourrait donner un indice pour identifier le moteur de la forte surrection actuelle.

	Accélération (mm/an ²)
Nord	0,011
Est	0,000
Up	-0,019

Tableau 14 : Valeurs des accélérations pour la station CHIZ

	Accélération (mm/an ²)
Nord	-0,018
Est	0,023
Up	-0,051

Tableau 15 : Valeurs des accélérations pour la station MODA

IV.3.2.5 Hypothèse 5 : Influence du relief

Pour l'ensemble des stations, une étude du relief est réalisée. Il se peut que la pente puisse influencer la direction que l'on retrouve dans le déplacement 2D de la station et qu'elle génère une accélération des signaux transitoires.



Figure 47 : Coupe CLAP (pente (en %), abscisse : coupe (m))

	Accélération (mm/an ²)	Vitesse (mm/an)
Nord	0,061	17,634
Est	-0,029	22,177
Up	0,250	-0,681

Tableau 16 : Valeurs des accélérations/vitesse pour la station CLAP

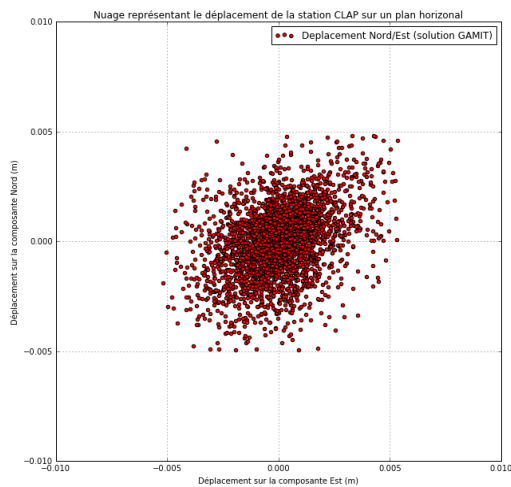


Figure 48 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CLAP

Vecteur accélération pour le signal transitoire long terme sur le plan horizontal : station CLAP

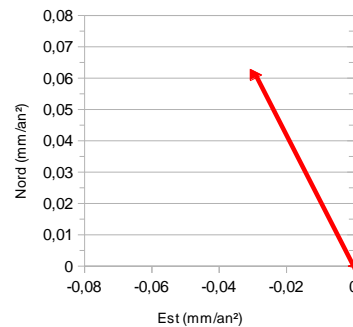


Figure 49 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CLAP

Station CLAP : la vitesse verticale de cette station est négative ; c'est une des stations de référence pour les mesures du glissement de terrain de La Clapière. Le site n'est pas très stable, mais il est conservé comme appui pour l'observation du glissement de terrain. La direction issue du déplacement 2D n'est pas corroborée par le vecteur qui représente la direction de l'accélération horizontale sur le long terme (Fig. 49). Un profil est réalisé à partir du MNT (Fig. 47) en prenant comme axe la direction qui sort de l'analyse du déplacement horizontal de la station (Nord-Est/Sud-Ouest) (Fig. 48). D'après le profil, cette station se trouve sur un versant de vallée avec une pente de 80 %. Les trois accélérations déterminées pour la station CLAP (Tab. 16) ressortent dans l'annexe 2 parmi les plus fortes accélérations.

Avec cette station, la pente ne semble pas pouvoir expliquer les signaux transitoires long terme sur les composantes horizontales ; elle corrobore seulement les déplacements issus des signaux transitoires résultant des phénomènes saisonniers. Elle peut cependant pour la composante verticale expliquer le signal transitoire long terme.

IV.3.2.6 Hypothèse 6 : Influence de la répartition spatiale des glaciers et des régions de lac glaciaires

Sept stations sont concernées par une comparaison du déplacement 2D des stations du RENAG et des accélérations avec les données GLIMS comportant la répartition spatiale des glaciers et des régions de lacs glaciaires.

Pour les stations CHAM, CHMX, CHTL et ROSD il ne semble pas y avoir de concordance entre la position des glaciers et les régions de lacs glaciaires et les mouvements transitoires des stations.

Pour les stations ALPE, MODA, PUYA : il y a concordance entre la position des glaciers par rapport aux stations et les directions issues des séries temporelles.

Exemple : station PUYA : des glaciers se situent 6 km au Nord-Ouest de la station (Fig. 51) et leur position concorde avec la direction donnée par le graphe issu de l'analyse du déplacement annuel 2D (Fig. 50). Il se peut que le poids de la neige en hiver crée une inflexion vers le NO de la station. Cette direction est en accord avec le vecteur qui représente la direction de l'accélération horizontale sur long terme (Fig. 52). Il se peut également que la pente influence la direction et le vecteur d'accélération car selon la direction donnée par le déplacement 2D la station se situe sur une pente proche de 80%.

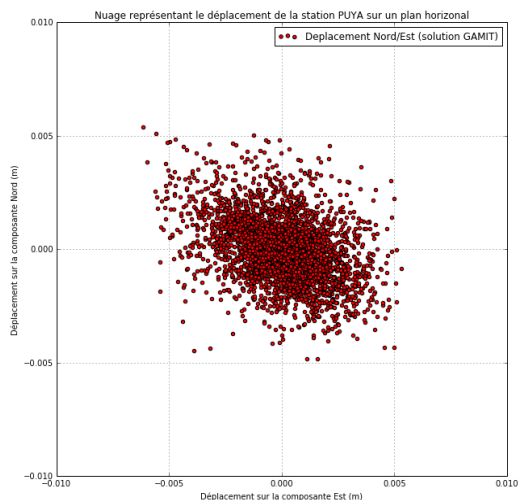


Figure 50 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station PUYA

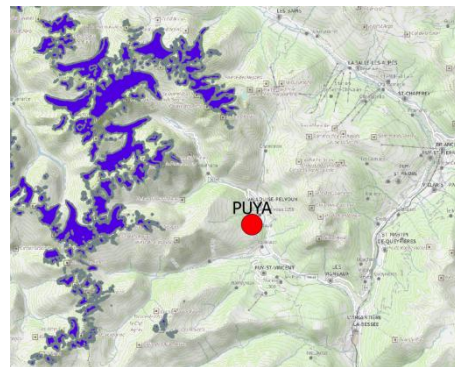


Figure 51 : Extrait de la carte répartition spatiale des glaciers et région de lac glaciaire de la station PUYA (Annexe 14)

Vecteur accélération pour le signal transitoire long terme sur le plan horizontal : station PUYA

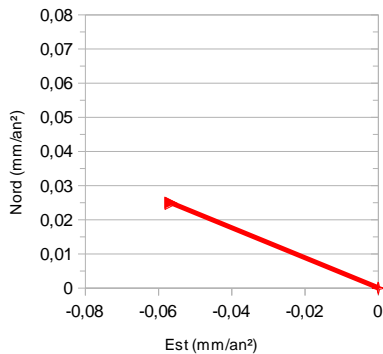


Figure 52 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station PUYA

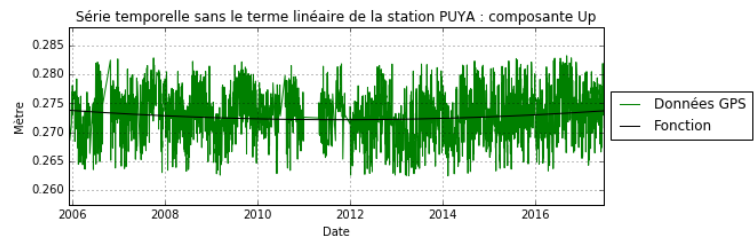


Figure 53 : Série temporelle sans le terme linéaire station PUYA (Up)

L'annexe 2 identifie la station PUYA parmi les plus fortes accélérations sur la composante verticale avec $0,046 \text{ mm/an}^2$ (série temporelle sur la composante Up : Fig. 53). La fonte des glaces est un acteur possible de création des signaux transitoires long terme, et des surrections en particulier.

IV.3.2.7 Hypothèse 7 : Influence des données piézométriques

L'hydrologie étant un candidat potentiel pour expliquer les signaux transitoires, il est intéressant de regarder les données piézométriques. Seulement huit stations (déplacement sur la composante Up) vont être comparées avec ces données, car on dispose de peu de mesures piézométriques proches des stations.

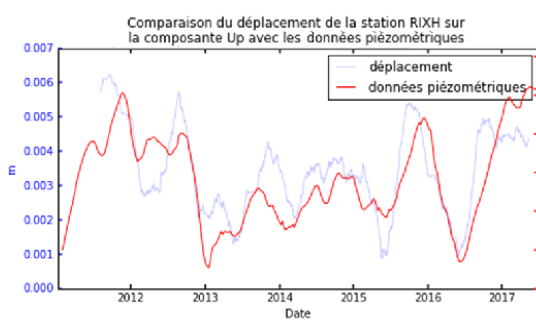


Figure 54 : Comparaison du déplacement vertical de la station RIXH avec les données piézométriques

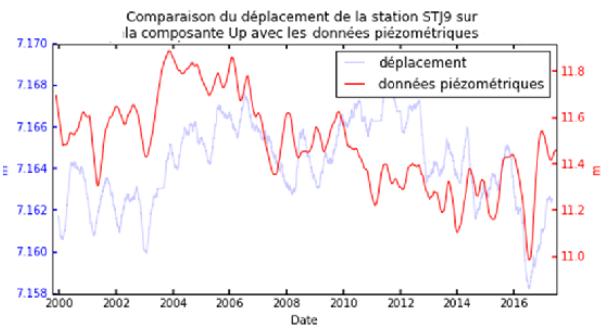


Figure 55 : Comparaison du déplacement vertical de la station STJ9 avec les données piézométriques

Pour six stations les coefficients de corrélation ne donnent pas de résultat. Cependant, pour les stations RIXH et STJ9 on obtient des résultats cohérents avec des coefficients de 0,52 (Fig. 54) et 0,40 (Fig. 55) respectivement. D'ailleurs, la corrélation positive de la position verticale avec la hauteur de la nappe phréatique indique un comportement poroélastique du sol.

Ces deux stations d'après l'annexe 2 font partie des accélérations les plus fortes sur la composante Up avec une accélération de -0.065 mm/an^2 pour la station STJ9 et 0.214 mm/an^2 pour la station RIXH.

Station	Accélération (mm/an ²) Données piézométriques	Accélération (mm/an ²) Séries temporelles
RIXH	21,970710	0,214836
STJ9	-0,050580	-0,065287

Tableau 17 : Accélérations issues des données piézométriques

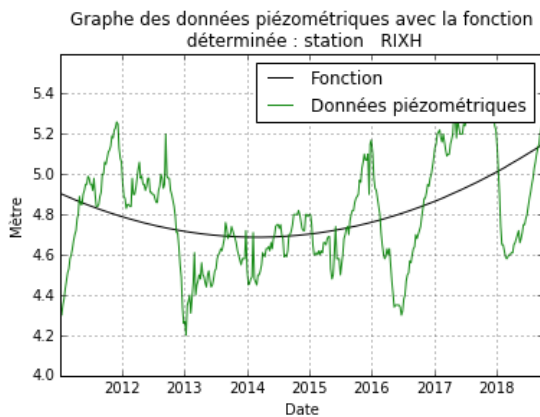


Figure 56 : Graphe des données piézométriques avec la fonction déterminée : station RIXH

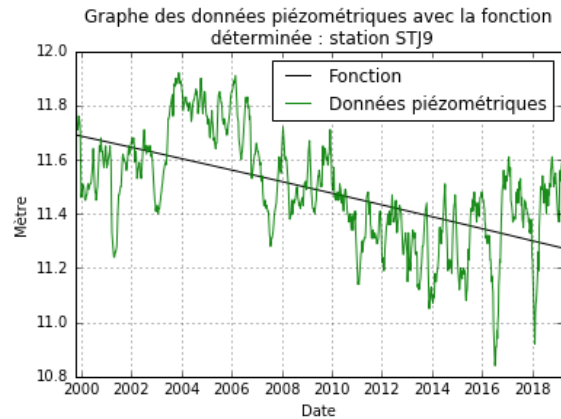


Figure 57 : Graphe des données piézométriques avec la fonction déterminée : station STJ9

Une accélération est calculée à partir des données piézométriques pour voir si on retrouve la même tendance que dans les séries temporelles des stations. Pour la station RIXH (Fig. 56), on obtient des accélérations proches en termes de valeur avec un facteur 100 pour celle issue des données piézométriques. Dans le cas de la station STJ9 (Fig. 57), les deux accélérations déterminées sont proches avec le même signe. Dans ces deux cas les signaux transitoires long terme semblent corroborer les enregistrements issus des données piézométriques. Le facteur d'échelle entre hauteur d'eau dans les nappes phréatiques et déplacement de surface n'est pas évident à identifier.

IV.3.2.8 Hypothèse 8 : Influence des précipitations

L'étude des données de précipitations n'a pas fourni de résultat concret en terme de chiffre (coefficient de corrélation). Cependant pour certaines stations elles semblent pouvoir identifier un certain nombre de pics et creux que l'on retrouve dans les séries temporelles (exemple station STJ9 : Fig. 58). Ces données sont un bon candidat pour l'étude des signaux transitoires long terme. En effet, en additionnant les précipitations par période de 6 mois, des tendances se dégagent de ces données (Tab. 18).

Station	Hauteur d'eau (mm/an ²) Données précipitations	Accélération Nord (mm/an ²) Séries temporelles
RIXH	-5,140475	0,214836
STJ9	-0,623302	-0,065287

Tableau 18 : Accélérations issues des données de précipitation

Pour la station STJ9, la tendance obtenue avec les données de précipitations donne un résultat avec le même signe que celle issue des séries temporelles des stations avec une valeur 10 fois plus importante pour l'accélération provenant des données de précipitations. Pour la station RIXH, il ne semble pas qu'il y ait de corrélation.

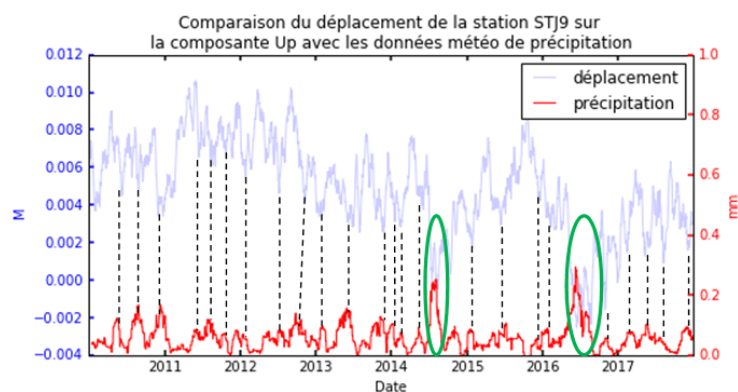


Figure 58 : Comparaison du déplacement de la station STJ9 sur la composante verticale avec les données de précipitations

Conclusion

Ce travail avait pour but de réaliser une analyse des mouvements transitoires visibles dans les séries temporelles des stations du RENAG sur une longue période d'acquisition (10 à 20 ans de mesure). Des comparaisons à partir de quatre solutions utilisant des méthodes de traitement, des paramètres de calculs et des modèles différents ont été mises en œuvre pour vérifier que les signaux long terme que l'on cherchait à étudier (les termes en accélération) ne provenaient pas d'un artefact d'une méthode de traitement mais bien d'une cause environnementale.

La comparaison des solutions géodésiques a montré que les stations du RENAG ne présentent pas seulement des signaux annuels ; elles présentent également des signaux transitoires long terme significatifs. Les deux sont issus des phénomènes locaux, ce qui limite la capacité des modèles hydrologiques réalisés par l'EOST pour les expliquer (car ils sont régionaux). Toutefois, pour certaines stations le signal annuel est bien reconstitué par les modèles hydrologiques, surtout sur la composante verticale. Les déplacements sur les composantes horizontales sont de manière générale sous-estimés en termes d'amplitude. L'observation des corrélations et anti-corrélations avec les modèles de surcharge pointe vers la présence des deux mécanismes : la réponse élastique de la Terre à la surcharge hydrologique et la théorie de la poroélasticité (mise en avant pour les sols poreux).

Pour l'interprétation des accélérations long terme, les modèles de surcharge ne sont pas adaptés car ils sont linéaires. Différentes données sont alors étudiées sur des sites proches des stations géodésiques avec des séries d'observation longues de paramètres environnementaux (piézomètres, pluviomètres, températures). Les mouvements saisonniers des stations sont corrélés avec certains paramètres tels que les variations de type de sol, les failles, les températures ... Pour certaines stations des hypothèses sont faites sur des corrélations entre les termes en accélération et la surcharge hydrologique (Lac de Roselend), les données piézométriques et les enregistrements de précipitations. Les stations ne réagissent pas de la même façon à ces différents paramètres environnementaux. Il est donc impossible de les généraliser pour les autres stations. De plus, la comparaison est limitée par le fait que peu de mesures sont vraiment proches des sites.

Les directions provenant des mouvements annuels ne corroborent pas tous les cas des accélérations. Les paramètres environnementaux doivent influencer aussi bien les

mouvements saisonniers que long terme dans certains cas mais ce n'est pas généralisable et probablement dépendant de la nature du sol local.

Afin d'approfondir cette étude, il serait intéressant de comparer les signaux transitoires avec plus de mesure environnementales proches des stations et sur une plus longue durée. De même, pour les données GNSS une étude sur une période encore plus longue serait favorable car il est possible que ces signaux proviennent de mouvement avec une période sur une dizaine d'années et qu'ils ne soient pas encore détectables.

Bibliographie

CHASSAGNE O., Le futur de la navigation par satellites : une précision à un centimètre avec le PPP. Revue XYZ, 2012, N°132 – 3e trimestre. (Consulté le 02/08/2019)

DEPREZ A., SOCQUET A., COTTE N., WALPERSDORF A., TARAYOUN A., Position time series and velocity fields in Europe derived from Global Navigation Satellite System data. (Consulté le 06/05/2019).

HEROUX P. and KOUBA J., GPS Precise Point positioning using IGS orbit products. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26. (Consulté le 02/08/2019)

HERRING T.A., KING R.W., McCLUSKY S.C., 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 50p.

MOREL L., FUND F., LEGROS R., DURAND S., FIACELIERE B., PPP, la maturité ?. Revue XYZ, 2014, N°138 – 1e trimestre. (Consulté le 02/08/2019)

NGUYEN H. N., VERNANT P., MAZZOTTI S., KHAZARADZE G., ASENSIO E., 3-D GPS velocity field and its implications on the present-day post-orogenic deformation of the Western Alps and Pyrenees. Solid Earth, [en ligne], 2016, 7. (Consulté le 06/05/2019).

PUSKAS C. M., MEERTENS C. M, PHILLIPS D., Hydrologic Loading Model Displacements from the National and Global Data Assimilation Systems (NLDAS and GLDAS). 2017 (Consulté le 25/07/2019)

TREGONING P., VAN DAM T., Effects of atmospheric pressure loading and seven parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. Journal of Geophysical Research Atmospheres, [en ligne], 2005, 110 ,B3. (Consulté le 17/06/2019)

VAN DAM T., WAHR J., MILLY P. C. D. et al, Crustal displacements due to continental water loading. Geophys. Res. Lett. , 2001. (Consulté le 29/07/2019)

WALPERSDORF A., SUE C., BAIZE S. et al, Coherence between geodetic and seismic deformation in a context of slow tectonic activity (SW Alps, France), Journal of Geodynamics, [en ligne], 2015, 85. (Consulté le 06/05/2019).

ZUMBERGE J. F., HEFTIN M. B., JEFFERSON D.C. et al, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of geophysical research, 1997, 102, NO. B3, p 5005-5017. (Consulté le 03/08/2019)

Browse reanalysis datasets. In : ECMWF. Advancing global NWP through international collaboration, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets>>. (Consulté le 10/05/2019)

Displacements for RENAG sites. In : EOST. EOST Loading Service, [en ligne]. Disponible sur : <http://loading.u-strasbg.fr/displ_renag.php>. (Consulté le 10/05/2019)

Detournay, E. & Cheng A.H.-D., Fundamentals of poroelasticity, [en ligne] 1993, <www.olemiss.edu/sciencenet/poronet/fundporo.pdf> (Consulté le 06/07/2019)

GIS Data of the World's Glaciers. In : DEMPSEY Caitlin. GIS LOUNGE, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.gislounge.com/gis-data-worlds-glaciers/>>. (Consulté le 16/05/2019)

GLIMS at NSIDC. In : International GLIMS community and the National Snow and Ice Data Center. GLIMS Glacier Database, [en ligne]. Disponible sur : <<https://nsidc.org/glims>>. (Consulté le 16/05/2019)

Liste des figures

Figure 1 : Structure de la croûte terrestre : croûte continentale et océanique	9
Figure 2 : Schéma de la réponse élastique de la croûte terrestre.....	11
Figure 3 : Schéma de la réponse poroélastique de la croûte terrestre	11
Figure 4 : Schéma du principe de la double différence	13
Figure 5 : Schéma de la méthode PPP.....	13
Figure 6 : Saut lié à un changement d'antenne non pris en compte (station TROP, solution EPOS, composante Up).....	19
Figure 7 : Graphe d'un exemple pour la détermination des termes en accélération/vitesse	20
Figure 8 : Série temporelle sans le terme linéaire réalisée avec la méthode 1 pour la station MODA et la solution SCRS.....	21
Figure 9 : Série temporelle sans le terme linéaire réalisée avec la méthode 2 pour la station MODA et la solution SCRS.....	23
Figure 10 : Graphique des mouvements en accélération pour les solutions GAMIT et EPOS sur la composante Nord.....	29
Figure 11 : Graphique des mouvements en accélération pour les solutions EPOS et SCRS sur la composante Nord.....	29
Figure 12 : Exemple de mouvements transitoires liés aux phénomènes de surcharges saisonnières avec les stations CHIZ et CHAM (solution GAMIT)	32
Figure 13 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Nord avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.	33
Figure 14 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Est avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.....	33
Figure 15 : Comparaison du déplacement de la station ALPE pour la composante Up avec la charge hydrologique (GLDAS2 et MERRA2_hyd) (solution GAMIT). Noter la différence d'échelle entre observations et modèles.....	34
Figure 16 : Comparaison du déplacement de la station BLIX pour la composante Nord avec la charge hydrologique MERRA2_hyd (solution GAMIT)	34
Figure 17 : Comparaison du déplacement de la station CLFD pour la composante Est avec la charge hydrologique MERRA2_hyd (solution GAMIT)	34
Figure 18 : Comparaison du déplacement de la station LROC pour la composante Est avec la charge hydrologique GLDAS2 (solution GAMIT)	35
Figure 19 : Comparaison du déplacement de la station MAKES pour la composante Est avec la charge hydrologique GLDAS2 (solution GAMIT)	35

Figure 20: Exemple de mouvement transitoire long terme avec la station WLBH (solution GAMIT)	36
Figure 21 : Comparaison du déplacement de la station WLBH avec la charge hydrologique GLDAS2 sur une longue période d'acquisition (solution GAMIT)	37
Figure 22 : Localisation des stations météo	40
Figure 23 : Schéma des différents déplacements possibles en présence de faille	41
Figure 24 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CHIZ	42
Figure 25 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CHRN	42
Figure 26 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CHIZ (c.f. Annexe 17)	43
Figure 27 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CHRN (c.f. Annexe 17)	43
Figure 28 : Série temporelle sans le terme linéaire station CHIZ (Up)	43
Figure 29 : Série temporelle sans le terme linéaire station CHRN (Up)	43
Figure 30 : Extrait de la carte géologique de la station CHIZ (Annexe 11)	44
Figure 31 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station MODA	45
Figure 32 : Extrait de la carte géologique de la station MODA (Annexe 11)	45
Figure 33 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station MODA	45
Figure 34 : Graphe de comparaison entre les données de température et de déplacement pour la station CHIZ	46
Figure 35 : Graphe de la corrélation Température / Déplacement (m) pour la station CHIZ (composante Nord)	46
Figure 36 : Graphe de la corrélation Température / Déplacement (m) pour la station CHIZ (composante Est)	46
Figure 37 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station ROSD	47
Figure 38 : Extrait de la carte hydrographique de la station ROSD (Annexe 10)	47
Figure 39 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station ROSD	47
Figure 40 : Série temporelle de la station ROSD sans le terme linéaire	48
Figure 41 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station NICE	48
Figure 42 : Extrait de la carte hydrographique de la station NICE (Annexe 10)	48
Figure 43 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station FCLZ	49
Figure 44 : Extrait de la carte hydrographique de la station FCLZ (Annexe 10)	49
Figure 45 : Extrait de la carte répartition spatiale des failles de la station CHIZ (Annexe 15)	50
Figure 46 : Extrait de la carte répartition spatiale des failles de la station MODA (Annexe 15)	50
Figure 47 : Coupe CLAP (pente (en %), abscisse : coupe (m))	51
Figure 48 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station CLAP	51
Figure 49 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station CLAP	51
Figure 50 : Nuage représentant le déplacement 2D de la station PUYA	52
Figure 51 : Extrait de la carte répartition spatiale des glaciers et région de lac glaciaire de la station PUYA (Annexe 14)	52
Figure 52 : Direction de l'accélération horizontale sur l'étude long terme de la station PUYA	53
Figure 53 : Série temporelle sans le terme linéaire station PUYA (Up)	53
Figure 54 : Comparaison du déplacement vertical de la station RIXH avec les données piézométriques	53
Figure 55 : Comparaison du déplacement vertical de la station STJ9 avec les données piézométriques	53
Figure 56 : Graphe des données piézométriques avec la fonction déterminée : station RIXH	54
Figure 57 : Graphe des données piézométriques avec la fonction déterminée : station STJ9	54
Figure 58 : Comparaison du déplacement de la station STJ9 sur la composante verticale avec les données de précipitations	55
Figure 59 : Capteurs de pression Paroscientific (BALLU V, 2018)	64
Figure 60 : Offset (distance et direction) entre le CM et le CF de la Terre (YODER 1995)	66
Figure 61 : Localisation CM et CF avec une déformation de la Terre solide (WU et al, 2012)	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau résumé des paramètres et modèles des différentes solutions GPS	17
Tableau 2 : Moyenne des incertitudes pour chaque solution	18
Tableau 3 : Moyennes des différences des vitesses avec le test 1.....	20
Tableau 4 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 1	20
Tableau 5 : Moyennes des différences des vitesses pour la première détermination avec le test 2 .	22
Tableau 6 : Moyennes des différences des vitesses pour la deuxième détermination avec le test 2	22
Tableau 7 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 2	23
Tableau 8 : Moyennes des différences des vitesses pour la première détermination avec le test 3 .	24
Tableau 9 : Moyennes des différences des vitesses pour la deuxième détermination avec le test 3	25
Tableau 10 : Moyennes des différences des accélérations avec le test 3	25
Tableau 11 : Résultats contenant les coefficients de corrélation et les probabilités de l'hypothèse H0 (pas de corrélation entre les deux solutions)	28
Tableau 12 : Géologie des sols pour les stations anti corrélées avec les modèles de surcharge hydrologique.....	45
Tableau 13 : Valeurs des accélérations pour la station ROSD.....	48
Tableau 14 : Valeurs des accélérations pour la station CHIZ	50
Tableau 15 : Valeurs des accélérations pour la station MODA	50
Tableau 16 : Valeurs des accélérations/vitesses pour la station CLAP.....	51
Tableau 17 : Accélérations issues des données piézométriques.....	54
Tableau 18 : Accélérations issues des données de précipitation	55
Tableau 19 : Résumé des paramètres des données de surcharge.....	68

Table des annexes

Annexe 2 : Les surcharges non-maréales (Non-tidal loading)	63
Annexe 3 : La circulation des fluides en profondeurs	65
Annexe 4 : Description des modèles environnementaux d'estimation de charge	66
Annexe 5 : Moyennes des incertitudes par stations (mm).....	69
Annexe 6 : Classement des stations par proximité des résultats entre les quatre solutions	70
Annexe 7 : Plus fortes accélérations (positive et négative) pour chaque composante (solution GAMIT) confirmé par les autres solutions.....	71
Annexe 8 : Classification des stations (comparaison séries temporelles/modèles de surcharge hydrologique)	73
Annexe 9 : Exemples graphiques de classification (comparaison séries temporelles/modèles de surcharge hydrologique).....	76
Annexe 10 : Exemple de carte avec les données hydrographiques.....	78
Annexe 11 : Exemple de carte avec les données géologiques	80
Annexe 12 : Relief station CLAP.....	81
Annexe 13 : Exemple de graphique avec les données météo (station météo proche de la station CHIZ)	82
Annexe 14 : Exemple de carte avec les données GLIMS	83
Annexe 15 : Exemple de carte avec la répartition spatiale des failles.....	84
Annexe 16 : Répartition spatiale des accélérations issues de la solution GAMIT	85
Annexe 17 : Tableau général 1 ^{er} partie.....	88
Annexe 18 : Tableau général 2 ^{ème} partie	93
Annexe 19 : Tableau général données piézométriques	97

Annexe 1 : Les surcharges maréales (Tidal)

Il est possible de corriger les déformations issues des surcharges maréales lors du traitement GNSS. C'est le cas des marées de la Terre solide/polaires et de la surcharge océanique/atmosphérique.

1. Les marées de la Terre solide

Comme pour les marées océaniques avec l'attraction de la Lune et du Soleil sur l'eau, on retrouve ce phénomène sur les continents. Ce sont les marées de la Terre solide. Ce type de marée entraîne des déformations de la croûte terrestre en éloignant les éléments de la croûte du centre de la Terre. La Lune et le Soleil entraînent des variations du champ de pesanteur qui modifient la force gravitationnelle et induisent des déformations à la surface de la Terre. Ce phénomène est périodique, il peut engendrer des déformations de l'ordre de 30 cm sur la composante verticale et 10 cm sur les composantes horizontales pour une période proche de 12 heures (CAZENAVE A. 2013)⁸. La Terre se comporte de manière parfaitement élastique en réponse à ces contraintes. Les marées de la Terre solide sont donc facilement modélisables et peuvent être corrigées lors du traitement GNSS.

2. La surcharge océanique

L'attraction de la Lune et du Soleil entraîne des déplacements des masses d'eau sur le continent en exerçant des forces de pression et de relâchement de l'eau ; ce sont les marées océaniques. Ces masses d'eau déplacées vont engendrer des déformations de la croûte terrestre qui va s'enfoncer ou s'élever ; c'est la surcharge océanique. Ces déplacements concernent principalement la composante verticale pour une période proche de 12 heures (avec des amplitudes jusqu'à 2 cm au Mans et jusqu'à 10 cm à Brest, FUND et al., 2010)⁹, mais ils impactent aussi faiblement les composantes horizontales. Des modèles sont utilisés pour corriger ces déplacements, c'est le cas du modèle FES2004 (LYARD et al., 2006)¹⁰. Ce type de surcharge touche plus fortement les zones proches des côtes et s'amointrit en s'en éloignant.

3. Les marées polaires

⁸ CAZENAVE A., La Terre et l'environnement observés depuis l'espace, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 235, octobre 2013.

⁹ FUND F., MOREL L., MOCQUET A., Estimation des déplacements causés par la surcharge océanique dans l'Ouest de la France à l'aide des réseaux GPS permanents. Revue XYZ, [en ligne], 2010, N°124 – 3e trimestre. (Consulté le 11/06/2019)

¹⁰ LYARD F., LEFEVRE F., LETELLIER T., FRANCIS O., Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004. Ocean Dynamics, [en ligne], 2006, 56. (Consulté le 17/06/2019)

Le phénomène de surcharge issu des marées polaires engendre une déformation élastique de la croûte terrestre. Cette déformation est causée par les mouvements polaires. Ces mouvements polaires proviennent des variations de la rotation de la Terre (due à l'action de la Lune et du Soleil avec les marées et aux variations saisonnières) en vitesse et en accélération et se caractérisent par un mouvement de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la croûte terrestre. Les mouvements polaires entraînent des déformations périodiques dues aux variations de la force centrifuge de la Terre qui entraîne des variations de la force de gravitation. Les mouvements varient selon deux types de périodes : en fonction des saisons (12 mois) et en fonction de la période de Chandler (14 mois) la combinaison des deux formant une période de 7 ans. Ces déformations peuvent atteindre des variations sur la composante verticale de l'ordre de 2,5 cm et sur les composantes horizontales des variations de l'ordre de 0,7 cm (SANZ SUBIRANA J. 2011)¹¹. Les déformations causées par les marées polaires sont bien connues et peuvent être corrigées avec le modèle IERS 2010. Ce modèle contient les paramètres de rotation de la Terre (avec leurs incertitudes). Ils vont servir à calculer les perturbations gravimétriques de la Terre pour corriger les déplacements issus de ce phénomène de marée.

4. La surcharge atmosphérique

La surcharge atmosphérique maréale entraîne des déformations de la croûte terrestre suite à des phénomènes de marées. Ces marées soulèvent l'atmosphère ce qui va entraîner des modifications du champ de pression (avec une période de 12 heures pour les marées générées par le Soleil et une période de 12 heures 25 pour les marées générées par la Lune). Ceci va engendrer une faible déformation de la croûte terrestre (« millimétrique », Convention IERS 2010). En raison du comportement périodique de la charge atmosphérique maréale, deux signaux sont identifiés : le signal diurne S1 et le signal semi-diurne S2. Ces signaux provoqués par les marées atmosphériques vont pouvoir être corrigés selon la convention IERS 2010 avec le modèle RP03 (Ray et Ponte 2003) qui est un modèle dérivé des champs de pression de surface réalisé par l'ECMWF.

¹¹ Pole Tide. In : SANZ SUBIRANA J., JUAN ZORNOZA J.M., HERNANDEZ PAJARES M., Technical University of Catalonia. ESA Navipedia. (Consulté le 13/06/2019)

Annexe 2 : Les surcharges non-maréales (Non-tidal loading)

On trouve d'autres phénomènes de surcharge qui viennent déformer la croûte terrestre ; c'est le cas de la surcharge atmosphérique non-maréale, de la surcharge liée à la pression des fonds des océans/mers et de la surcharge hydrologique.

1. La surcharge atmosphérique

Ce phénomène de surcharge induit des déformations élastiques de la Terre par le biais des variations de pression atmosphérique et donc du poids de l'atmosphère. Cette surcharge n'est pas due à l'attraction de la Lune ou du Soleil. Elle provient des modifications météorologiques (les variations globales de la pression de surface peuvent déplacer la surface de la Terre de plus de 1 cm à la fois verticalement et horizontalement sur des échelles de temps annuelles où inférieures à 24 h, WIJAYA et al 2013)¹². Ce type de surcharge peut être corrigé à l'aide d'une fonctionnalité disponible sur le logiciel GAMIT avec le modèle de Tregoning et van Dam (TREGONING & van DAM, 2005)¹³. Ce modèle permet d'évaluer la surcharge atmosphérique à partir des variations de pressions maréales et non-maréales (il n'y a donc pas de distinction entre surcharge maréales et non-maréales). Ce modèle utilise les données de champ de pression de surface du modèle ré-analysé du Centre National de Prévision Environnementale (NCEP) avec les fonctions de Green (ces fonctions permettent d'analyser la déformation d'un solide élastique).

2. La surcharge liée à la pression aux fonds des océans

Cette surcharge résulte de trois facteurs différents (Chambers D et al, 2010)¹⁴ : celui qui a le plus d'influence est lié au vent et au transport de masse qu'il entraîne. Cela génère une redistribution des masses internes soit une circulation dans les océans et dans l'atmosphère (donc des changements de pressions). Les deux autres facteurs intervenant sur la pression au fond des océans sont la masse de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus et l'effet du baromètre inversé. Cet effet désigne une interaction entre l'atmosphère et l'océan ; plus l'atmosphère va peser sur l'océan, plus l'océan va s'enfoncer. Ainsi les

¹² WIJAYA D., BOHM J., KARBON M., KRASNA H., SCHUH H., (2013). Atmospheric Pressure Loading in Atmospheric Effects in Space Geodesy, 2013, pp. 137-157

¹³ TREGONING P., VAN DAM T., Effects of atmospheric pressure loading and seven parameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. Journal of Geophysical Research Atmospheres, [en ligne], 2005, 110 ,B3. (Consulté le 17/06/2019)

¹⁴ CHAMBERS D. and WILLIS J. K., A Global Evaluation of Ocean Bottom Pressure from GRACE, OMCT, and Steric-Corrected Altimetry. Marine Science Faculty Publications, [en ligne] 2010, 176. (Consulté le 04/07/2019)

modifications de pression liées au poids de l'atmosphère perturbent la pression aux fonds des océans.

Ce type de surcharge n'est pas facilement modélisable en raison de la difficulté des méthodes de mesures à cause du bruit environnant (mouvements de la croûte terrestre liées à d'autres phénomènes de surcharge) et de la dérive des capteurs de mesure (BALLU V, 2018)¹⁵. La méthode de mesure pour obtenir la pression aux fonds des océans se fait à l'aide de capteurs. Exemple : les capteurs Paroscientific (Fig. 59) ; ils « sont connectés au nœud SEAMON Ouest avec une transmission en temps quasi réel des données par acoustique puis iridium vers la terre » (BALLU V, 2018).

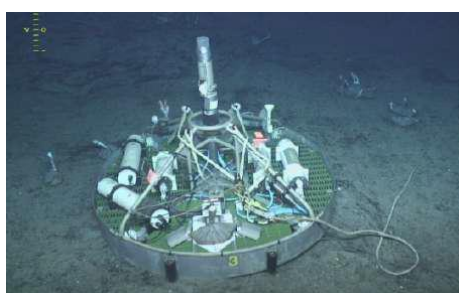


Figure 59 : Capteurs de pression Paroscientific (BALLU V, 2018)

Ces mesures permettent de suivre les déplacements verticaux des fonds marins et donc d'observer les déformations de la croûte terrestre. Ces déformations se font principalement sur la composante verticale. Si la pression augmente la croûte s'enfonce et inversement (« En général, une variation de 1 hPa de la pression de fond de l'océan équivaut à une variation de 1 cm de la hauteur de l'eau de mer et du déplacement vertical du fond marin. », INAZU et al, 2012)¹⁶. Ainsi une modification de pression positive de 1 hPa entraîne un enfoncement vertical du fond marin de 1 cm qui est accompagné d'une diminution de la hauteur de la surface de la mer.

¹⁵ BALLU V., De la géodésie spatiale à la géodésie sous-marine : Quantifier et comprendre les mouvements de la croûte terrestre. Sciences de la Terre et de l'Univers, La Rochelle : Université de La Rochelle, 2018, 148 p.

¹⁶ INAZU D., HINO R., FUJIMOT H. A global barotropic ocean model driven by synoptic atmospheric disturbances for detecting seafloor vertical displacements from in situ ocean bottom pressure measurements. Marine Geophysical Research, [en ligne], 2012, 33. (Consulté le 18/06/2019).

Annexe 3 :La circulation des fluides en profondeurs

La circulation des fluides en profondeurs peut aussi avoir une influence sur la croûte terrestre en déformant les roches. En profondeur, deux types de flux interviennent :

- Les flux issus du cycle hydrologique. Ils peuvent pénétrer la croûte terrestre (profonde ou non). Cependant ce type de flux représente une faible partie des fluides en circulation dans la croûte.
- Les flux issus des phénomènes de convection, compactage, dilatation thermique, déshydratation des minéraux et de la maturation organique.

Ainsi dans la croûte terrestre il y a bien une interaction entre les fluides et les roches qui peuvent être métamorphisés/déformés (Les fluides interagissent avec les roches dès les premiers stades de sédimentation et de diagenèse dans les bassins jusqu'à ce que ces roches soient déformées et / ou enfouies et métamorphisées en orogènes, puis éventuellement exhumées. LACOMBE 2016)¹⁷. Mais cette interaction dépend de la profondeur de la croûte terrestre. En effet, plus on s'enfonce dans la croûte terrestre plus les températures et la pression augmentent ce qui modifie le comportement des roches. On ne retrouve pas les mêmes déformations dans la croûte terrestre supérieure et inférieure.

Les mesures GNSS à la surface ne sont probablement pas sensibles à ces déformations profondes. Le phénomène de circulation des fluides en profondeur ne sera donc pas interprété par la suite dans la série temporelle.

¹⁷ LACOMBE O., ROLLAND Y., Fluids in crustal deformation: Fluid flow, fluid-rock interactions, rheology, melting and resources. *Journal of Geodynamics*, [en ligne] 2016, 101. (Consulté le 18/06/2019).

Annexe 4 : Description des modèles environnementaux d'estimation de charge

1. Systèmes de coordonnées (Centre de Masse/ Centre de Figure)

Les déplacements issus des modèles de surcharge hydrologique sont donnés dans deux systèmes de coordonnées qui sont liées soit au centre de masse (CM) soit au centre de figure (CF) (Fig. 60 et Fig. 61). Pour le centre de figure l'origine du référentiel correspond au centre géométrique de la Terre alors que pour le centre de masse, l'origine correspond au centre d'inertie de la Terre (METIVIER et al, 2011)¹⁸.

Figure offset ($R_{CF} - R_{CM}$) (km) 0.80
Offset (lat./long.) 46°/35°

Figure 60 : Offset (distance et direction) entre le CM et le CF de la Terre (YODER 1995)¹⁹

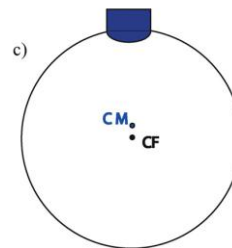


Figure 61 : Localisation CM et CF avec une déformation de la Terre solide (WU et al, 2012)²⁰

On va comparer les déplacements GPS des stations avec les modèles de charge calculés dans le système de coordonnées centre de figure car les données des solutions GPS lors de la mise en référence dans le calcul GPS sont dans ce système.

2. ERA

Les effets de surcharge hydrologique ERA représentent l'humidité du sol et la neige, ils sont fournis en millimètres pour les composantes Nord, Est et Up avec une résolution temporelle de 6 heures. Cette charge hydrologique est estimée à partir des données ERA-interim (site EOST).

Ces données sont accessibles au public et elles sont produites par l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Le modèle ERA-interim est une nouvelle analyse atmosphérique globale depuis 1979 qui est mis à jour en temps réel.

Ces données couplent trois modèles (site ECMWF Reanalysis²¹) :

¹⁸ METIVIER L., ALTAMINI Z., COLLILIEUX X., Les mouvements séculaires du géocentre, le réchauffement climatique et l'ITRF. Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n° 77, 2011. (Consulté le 05/08/2019)

¹⁹ YODER, Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants, Astrometric and geodetic data, 1995, p 12. (Consulté le 05/08/2019)

²⁰ WU X., RAY J, van Dan T., Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications. Journal of Geodynamics, 2012, 44, 61. (Consulté le 05/08/2019)

²¹ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-reanalysis-datasets>

- Un modèle atmosphérique
- Un modèle de surface terrestre : le modèle de sol utilisé est le modèle TESSEL (DEE D. P. et al 2011)²²
- Un modèle représentant l'impact des vagues océaniques. Ce modèle de prévision est basé sur un modèle d'onde. Il va représenter l'impact de ces vagues sur le flux d'air en couplant des données issues des champs de vents et de paramètres atmosphériques qui jouent sur les vagues.

3. MERRA

Les effets de surcharge hydrologique MERRA représentent l'humidité du sol et la neige, ils sont fournis en millimètres pour les composantes Nord, Est et Up avec une résolution temporelle de 1 heure. Cette charge hydrologique est estimée à partir des données MERRA-LAND (site EOST).

MERRA-LAND est directement forcé par MERRA, après amélioration du modèle de sol. La grande différence entre MERRA-2 et MERRA-LAND réside dans le fait que MERRA-LAND utilise seulement des observations de jauge. Ainsi on obtient un ensemble de données météorologiques près de la surface qui est moins cohérent que celui de MERRA-2 (qui utilise en plus des observations satellitaires des précipitations).

4. MERRA2_hyd

Les effets de surcharge hydrologique MERRA2_hyd représentent l'humidité du sol et la neige, ils sont fournis en millimètres pour les composantes Nord, Est et Up avec une résolution temporelle de 1 heure. Cette charge hydrologique est estimée à partir des données MERRA-2 : Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (site EOST).

MERRA-2 est réalisée en couplant un modèle atmosphérique et un modèle hydrologique. Il utilise les données atmosphériques GEOS-5.12.4 et des observations de précipitations. Ces précipitations sont corrigées avec la combinaison d'observations satellitaires des précipitations et des observations par jauge.

5. GLDAS

²² DEE D. P., UPPALA S. M., SIMMONS A. J., BERRISFORD P. et al, The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system, Journal of the Royal Meteorological Society Q. J. R. Meteorol. 2011

Les effets de surcharge hydrologique GLDAS représentent l'humidité du sol, la neige et l'eau de la canopée, ils sont fournis en millimètres pour les composantes Nord, Est et Up avec une résolution temporelle de 3 heures. Cette charge hydrologique est estimée à partir des données GLDAS-1 qui sont simulées selon différents modèles de surface terrestre (CLM, Mosaic, NOAH et VIC). Le modèle de charge hydrologique fourni par l'EOST utilise la version 2.7 de NOAH (site EOST). La différence entre les précédents modèles et les données GLDAS-1 est qu'il n'y a pas de couplage de modèle hydrologique avec un modèle atmosphérique. Pour les modèles hydrologiques seuls, il y a un forçage des données par différents flux tels que les précipitations, la température, l'humidité... (RODELL M. et al 2004)²³.

6. GLDAS2

Les effets de surcharge hydrologique GLDAS2 représentent l'humidité du sol, la neige et l'eau de la canopée, ils sont fournis en millimètres pour les composantes Nord, Est et Up avec une résolution temporelle de 3 heures. Cette charge hydrologique est estimée à partir des données GLDAS-2 qui utilisent la version 3.3 de NOAH (site EOST). De même que les données GLDAS-1, le modèle hydrologique GLDAS-2 n'est pas couplé avec un modèle atmosphérique. Cependant, il est forcé avec les données météorologiques de Princeton (WANG W et al 2016)²⁴.

7. Tableau résumé des paramètres de données de surcharge hydrologique :

	MERRA	ERA	MERRA2_hyd	GLDAS	GLDAS2
Résolution temporelle :	1 heure	6 heures	1 heure	3 heures	3 heures
Représentation :	humidité du sol, neige			humidité du sol, neige, eau de la canopée	
Estimé à partir de :	MERRA-LAND	ERA-interim	MERRA-2	GLDAS-1	GLDAS-2
Réalisation :	forcé par MERRA	modèles atmosphériques couplés avec modèles hydrologiques		modèles hydrologiques seuls	

Tableau 19 : Résumé des paramètres des données de surcharge

²³ RODELL M., HOUSER P. R., JAMBOR U. et al, The Global Land Data Assimilation System, Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85, 3. (Consulté le 14/05/2019)

²⁴ WANG W., CUI W., WANG X. et CHEN X., Evaluation of GLDAS-1 and GLDAS-2 Forcing Data and Noah Model Simulations over China at the Monthly Scale. Journal of Hydrometeorology, [en ligne], 2016, 17, 11. (Consulté le 14/05/2019)

Annexe 5 : Moyennes des incertitudes par stations (mm)

Station	Incertitude EPOS (CNRS-ISterre) (mm)			Incertitude EPOS (INGV) (mm)			Incertitude GAMIT (mm)			Incertitude SCRS (mm)		
	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up	Nord	Est	Up
AGDE	2,10	1,84	7,18	0,51	1,30	0,37	0,95	0,85	3,23	0,91	1,82	2,82
AIGL	2,44	2,41	8,50	0,48	0,96	0,35	1,20	1,29	4,12	1,17	2,29	3,59
ALPE	1,63	1,40	5,55	0,45	1,26	0,38	0,75	0,65	2,62	0,87	1,74	2,93
AUBU	2,97	2,54	12,04	0,52	1,15	0,45	1,81	1,54	6,89	1,23	2,28	4,95
BANN	1,90	1,65	6,36	0,52	1,04	0,39	0,81	0,73	2,70	0,87	1,74	2,73
BLIX	1,92	1,68	6,61	0,44	1,16	0,34	0,87	0,76	2,96	0,91	1,72	3,02
BUAN	2,17	1,80	6,97	0,45	0,95	0,39	1,04	0,85	3,10	0,86	1,65	2,57
CHAM	3,06	3,28	8,89	0,42	1,03	0,33	0,94	0,81	3,42	1,18	2,11	4,07
CHIZ	2,10	1,81	6,84	0,53	0,99	0,38	1,00	0,93	3,03	0,90	1,71	2,84
CHMX	2,16	1,93	7,70	0,43	1,13	0,36	1,05	0,95	3,45	1,14	2,19	3,92
CHRN	2,12	1,88	7,29	0,50	0,94	0,38	0,98	0,88	3,36	1,11	1,99	3,47
CHTL	1,77	1,65	6,52	0,52	1,14	0,41	0,77	0,76	3,05	1,08	2,11	4,29
CLAP	2,82	2,53	10,24	0,54	1,10	0,42	1,59	1,46	5,30	1,19	2,16	4,13
CLFD	2,36	2,00	7,62	0,52	0,94	0,38	1,09	0,93	3,50	1,00	1,75	3,22
CRAL	2,15	1,89	7,21	0,43	0,96	0,29	0,99	0,91	3,28	0,81	1,59	2,57
ERCK	2,04	1,67	6,53	0,45	1,14	0,40	1,01	0,81	3,04	0,90	1,65	2,80
FCLZ	2,76	2,47	10,10	0,49	1,07	0,39	1,18	1,06	4,20	1,09	2,03	4,03
GINA	2,06	1,88	7,11	0,66	1,27	0,50	0,95	0,87	3,31	1,14	2,01	3,89
JOUX	1,91	1,62	6,12	0,48	1,02	0,40	0,81	0,69	2,58	0,98	1,74	3,17
LACA	2,12	1,91	7,81	0,46	1,05	0,33	1,00	0,92	3,68	1,07	2,05	3,73
LEBE	1,98	1,69	6,57	0,47	1,30	0,40	0,82	0,71	2,72	0,98	1,92	2,89
LFAZ	2,37	2,07	8,05	0,89	1,91	0,73	1,09	0,98	3,68	0,90	1,77	2,88
LROC	3,83	3,54	8,45	0,47	1,07	0,33	1,03	0,96	3,22	0,87	1,68	2,76
MAKS	1,99	1,65	6,41	0,40	1,16	0,37	1,10	0,91	3,41	0,89	1,69	2,62
MAN2	1,94	1,62	6,18	0,42	1,04	0,33	0,98	0,86	2,79	0,87	1,67	2,58
MANS	2,17	1,90	7,00	3,08	4,91	2,31	1,11	0,99	3,24	1,09	1,93	3,36
MICH	1,86	1,63	6,34	0,64	1,35	0,48	0,92	0,82	3,06	1,07	1,88	3,59
MODA	2,14	1,81	7,23	0,55	1,45	0,46	1,15	0,94	3,45	1,33	2,12	4,03
MTPL	2,07	1,84	7,00	0,52	1,42	0,39	0,93	0,84	3,17	1,09	1,97	3,55
NICE	2,12	1,84	7,10	0,56	1,19	0,44	0,97	0,85	3,26	1,08	2,05	3,43
PALI	2,06	1,79	6,99	0,73	1,52	0,54	0,89	0,78	3,00	0,86	1,72	2,64
PARD	2,27	1,98	7,68	0,81	1,79	0,58	1,05	0,95	3,49	0,90	1,77	2,92
PLOE	2,20	1,85	7,03	0,53	0,81	0,38	1,18	1,07	3,46	0,99	1,70	3,29
PUYA	1,84	1,63	6,58	0,74	1,53	0,58	0,76	0,70	2,84	0,96	1,81	3,64
RIXH	2,45	2,06	8,40	0,57	1,55	0,54	1,18	1,00	3,95	0,90	1,71	3,03
ROSD	2,04	1,75	7,18	0,40	1,10	0,34	0,89	0,76	3,13	1,26	2,41	4,40
RSTL	1,81	1,60	6,11	0,56	0,96	0,42	0,77	0,69	2,61	1,99	2,49	4,55
SAUV	2,07	1,81	7,01	1,68	3,24	1,28	0,92	0,82	3,14	2,34	2,65	5,16
SETE	2,16	1,90	7,38	0,83	1,66	0,61	0,95	0,84	3,18	0,84	1,70	2,76
SLVT	2,15	1,87	7,36	0,54	1,21	0,40	1,05	0,95	3,57	0,89	1,74	2,87
SMTG	2,64	2,17	8,24	2,33	4,58	1,78	1,39	1,19	3,96	0,85	1,61	2,55
SOPH	2,06	1,81	7,15	0,48	1,08	0,37	0,97	0,93	3,43	1,02	1,88	3,61
STEY	1,93	1,65	6,35	0,44	1,10	0,35	0,84	0,74	2,77	0,89	1,73	2,74
STJ9	1,90	1,59	6,05	0,58	1,37	0,47	0,90	0,73	2,68	1,08	1,91	3,26
TROP	1,96	1,74	6,70	0,47	1,24	0,37	0,86	0,76	2,95	0,86	1,69	2,87
WLBH	3,05	2,57	13,01	0,54	1,15	0,44	1,82	1,49	6,55	1,33	2,06	4,85

Annexe 6 : Classement des stations par proximité des résultats entre les quatre solutions

Station	D (Calcul 1) (mm)
MICH	0,087617
SAUV	0,096110
CHRN	0,103886
JOUX	0,105411
MTPL	0,105411
WLBH	0,113793
AGDE	0,121869
CHIZ	0,125005
SOPH	0,127744
MODA	0,132070
STJ9	0,147974
ALPE	0,153099
CHTL	0,161207
MAKS	0,164831
LROC	0,165292
PUYA	0,166669
STEY	0,169226
BANN	0,169747
LEBE	0,170737
BUAN	0,173256
GINA	0,178715
PLOE	0,179843
NICE	0,180386
BLIX	0,181402
ROSD	0,182137
ERCK	0,185146
AIGL	0,188184
MAN2	0,202211
PARD	0,210652
LFAZ	0,251660
CLAP	0,278824
PALI	0,284667
CLFD	0,291286
RSTL	0,313093
SLVT	0,316087
CHAM	0,329324
TROP	0,381857
FCLZ	0,404219
CRAL	0,442780
MANS	0,488940
LACA	0,497205
RIXH	0,767928
CHMX	0,824185
AUBU	1,011385
SETE	1,064317
SMTG	1,245568

Station	D (Calcul 2) (mm)
MTPL	0,059867
PALI	0,059975
SAUV	0,060009
MODA	0,062320
SOPH	0,062833
PARD	0,062942
CHRN	0,064952
BUAN	0,065185
WLBH	0,066941
JOUX	0,066984
MICH	0,070889
CHTL	0,070951
NICE	0,071377
MAN2	0,073009
BLIX	0,073391
STJ9	0,074511
AGDE	0,078815
FCLZ	0,080596
ERCK	0,084963
CHIZ	0,086212
GINA	0,087947
ALPE	0,095728
SETE	0,096011
CLFD	0,104286
LROC	0,127373
BANN	0,134900
PLOE	0,139029
SLVT	0,139503
PUYA	0,139652
STEY	0,140264
LFAZ	0,140750
MAKS	0,142962
AIGL	0,150706
CLAP	0,152897
ROSD	0,155436
RSTL	0,180657
LEBE	0,186505
RIXH	0,211800
CHAM	0,213868
CRAL	0,231238
AUBU	0,246569
SMTG	0,248086
LACA	0,277752
TROP	0,298098
MANS	0,368812
CHMX	0,597557

Annexe 7 : Plus fortes accélérations (positive et négative) pour chaque composante (solution GAMIT) confirmé par les autres solutions

Composante Nord :

Accélération négative :

Station	Accélération (mm/an ²)
RIXH	-0,033982
CLFD	-0,035675
BUAN	-0,051474
SETE	-0,052730
CRAL	-0,062248
BLIX	-0,074956
MAN2	-0,077087
SMTG	-0,281569

Accélération positive :

Station	Accélération (mm/an ²)
ROSD	0,027622
SOPH	0,029330
CHTL	0,030983
PLOE	0,033272
CHAM	0,035341
MAKS	0,035391
TROP	0,050711
AUBU	0,055116
CLAP	0,061017
MANS	0,106663

Composante Est :

Accélération négative :

Station	Accélération (mm/an ²)
MAKS	-0,028414
CLAP	-0,029076
CLFD	-0,030540
ALPE	-0,035208
PARD	-0,039336
PUYA	-0,056575
ROSD	-0,059894
CHMX	-0,091970
SETE	-0,113029
SMTG	-0,707420

Accélération positive :

Station	Accélération (mm/an ²)
ERCK	0,029183
AUBU	0,036483
BLIX	0,043702
FCLZ	0,046384
BUAN	0,047243
CRAL	0,065530
MANS	0,085226
MAN2	0,102247
AGDE	0,109390

Composante Up :

Accélération négative :

Station	Accélération (mm/an ²)
JOUX	-0,034792
MICH	-0,041899
SAUV	-0,047874
MODA	-0,050644
CHTL	-0,054333
SOPH	-0,062067
TROP	-0,064177
STJ9	-0,065287
LEBE	-0,069634
NICE	-0,076024

Accélération positive :

Station	Accélération (mm/an ²)
BLIX	0,038246
PUYA	0,046085
GINA	0,058397
ROSD	0,060742
CRAL	0,106266
RIXH	0,214836
CLAP	0,250624
MANS	0,455774

AGDE	-0,076536
CHRN	-0,082854
BANN	-0,093539
CLFD	-0,095122
AIGL	-0,108397
WLBH	-0,114656
ERCK	-0,120875
CHAM	-0,148358
BUAN	-0,149914
SLVT	-0,201630
SMTG	-0,205478
AUBU	-0,471967

Annexe 8 : Classification des stations (comparaison séries temporelles/modèles de surcharge hydrologique)

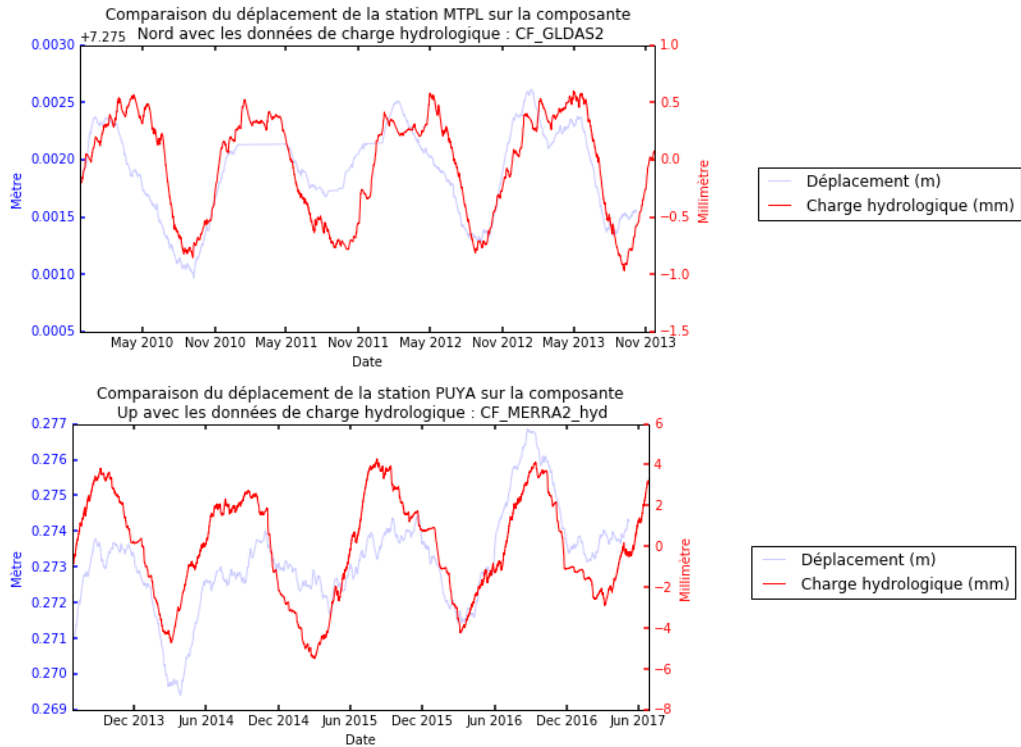
Station	Composante	GLDAS2				MERRA2_hyd			
		Corrélation	Anti-corrélation	Déphasage	Pas de cohérence	Corrélation	Anti-corrélation	Déphasage	Pas de cohérence
AGDE	Nord	✓				✓			
	Est				✓		✓		
	Up		✓				✓		
AIGL	Nord				✓				✓
	Est			✓		✓			
	Up				✓				✓
ALPE	Nord	✓				✓			
	Est	✓				✓			
	Up	✓						✓	
AUBU	Nord			✓				✓	
	Est			✓		✓			
	Up		✓					✓	
BANN	Nord	✓				✓			
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
BLIX	Nord	✓				✓			
	Est			✓		✓			
	Up			✓				✓	
BUAN	Nord				✓			✓	
	Est				✓	✓			
	Up	✓						✓	
CHAM	Nord	✓				✓			
	Est			✓		✓			
	Up	✓				✓			
CHIZ	Nord		✓				✓		
	Est		✓				✓		
	Up		✓				✓		
CHMX	Nord			✓				✓	
	Est	✓				✓			
	Up	✓				✓			
CHRN	Nord				✓				✓
	Est				✓		✓		
	Up				✓				✓
CHTL	Nord	✓						✓	
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
CLAP	Nord	✓				✓			
	Est			✓		✓			
	Up	✓				✓			
CLFD	Nord		✓				✓		
	Est		✓				✓		
	Up	✓				✓			
CRAL	Nord			✓				✓	
	Est			✓				✓	

	Up				✓				✓
ERCK	Nord				✓		✓		
	Est				✓		✓		
	Up	✓				✓			
FCLZ	Nord	✓				✓			
	Est			✓		✓			
	Up		✓				✓		
GINA	Nord	✓				✓			
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
JOUX	Nord			✓				✓	
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
LACA	Nord	✓				✓			
	Est				✓				✓
	Up			✓				✓	
LEBE	Nord				✓				✓
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
LFAZ	Nord			✓				✓	
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
LROC	Nord			✓				✓	
	Est	✓						✓	
	Up				✓				✓
MAKS	Nord				✓			✓	
	Est				✓				✓
	Up	✓				✓			
MAN2	Nord				✓		✓		
	Est		✓				✓		
	Up			✓				✓	
MANS	Nord				✓			✓	
	Est		✓					✓	
	Up				✓				✓
MICH	Nord	✓				✓			
	Est	✓				✓			
	Up				✓				✓
MODA	Nord	✓						✓	
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
MTPL	Nord	✓				✓			
	Est	✓							✓
	Up	✓				✓			
NICE	Nord	✓				✓			
	Est		✓				✓		
	Up				✓				✓
PALI	Nord				✓				✓
	Est	✓				✓			
	Up		✓				✓		
PARD	Nord	✓				✓			
	Est				✓	✓			
	Up				✓				✓

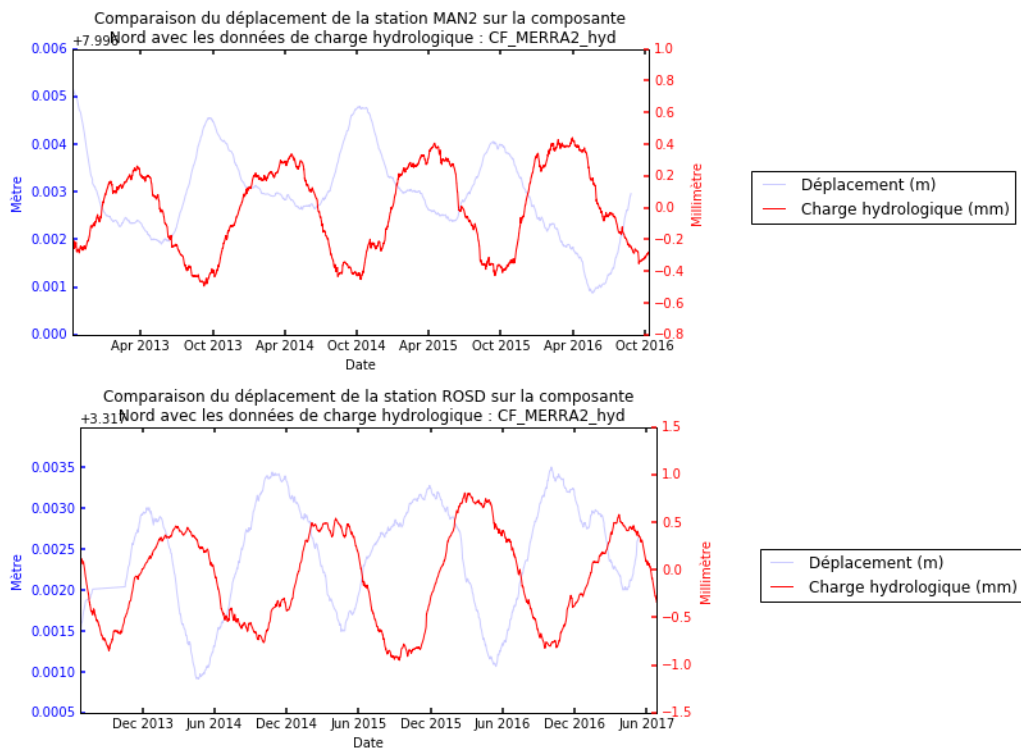
PLOE	Nord	✓				✓			
	Est			✓				✓	
	Up			✓				✓	
PUYA	Nord	✓				✓			
	Est		✓				✓		
	Up	✓				✓			
RIXH	Nord		✓				✓		
	Est				✓				✓
	Up			✓				✓	
ROSD	Nord				✓		✓		
	Est	✓				✓			
	Up				✓				✓
RSTL	Nord	✓				✓			
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
SAUV	Nord	✓				✓			
	Est				✓		✓		
	Up				✓				✓
SETE	Nord	✓				✓			
	Est		✓				✓		
	Up				✓				✓
SLVT	Nord				✓				✓
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
SMTG	Nord				✓				✓
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
SOPH	Nord	✓				✓			
	Est			✓				✓	
	Up				✓				✓
STEY	Nord	✓							✓
	Est			✓		✓			
	Up				✓	✓			
STJ9	Nord				✓				✓
	Est				✓				✓
	Up				✓				✓
TROP	Nord	✓				✓			
	Est	✓				✓			
	Up				✓				✓
WLBH	Nord	✓				✓			
	Est	✓				✓			
	Up		✓				✓		

Annexe 9 : Exemples graphiques de classification (comparaison séries temporelles/modèles de surcharge hydrologique)

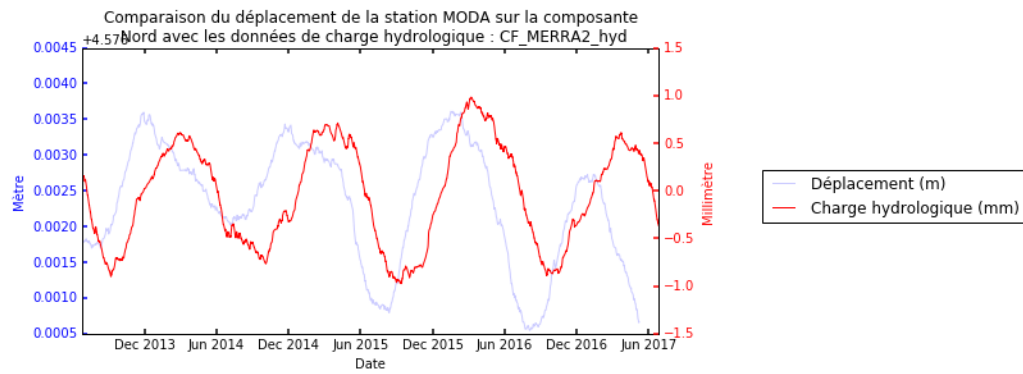
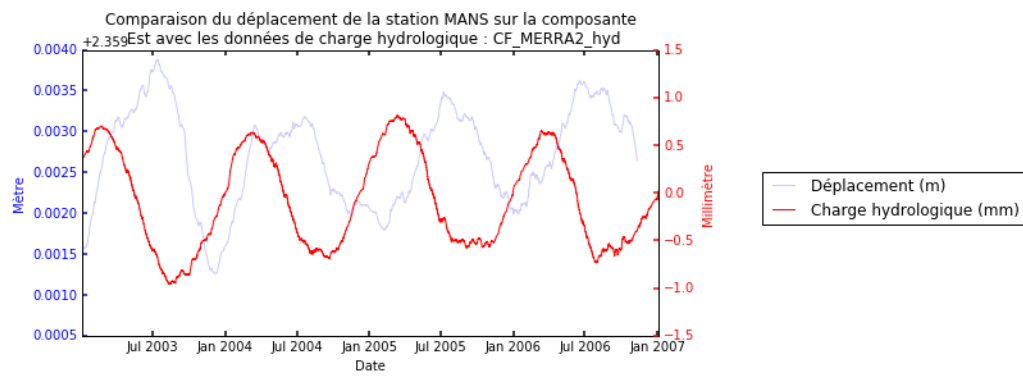
Corrélation :



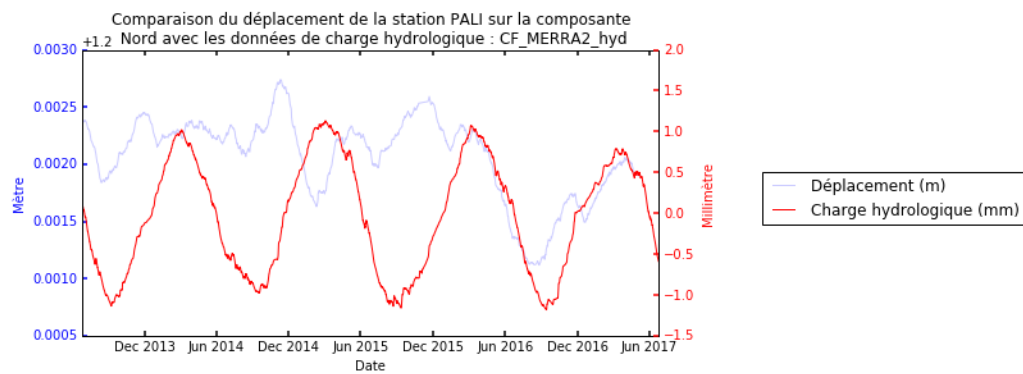
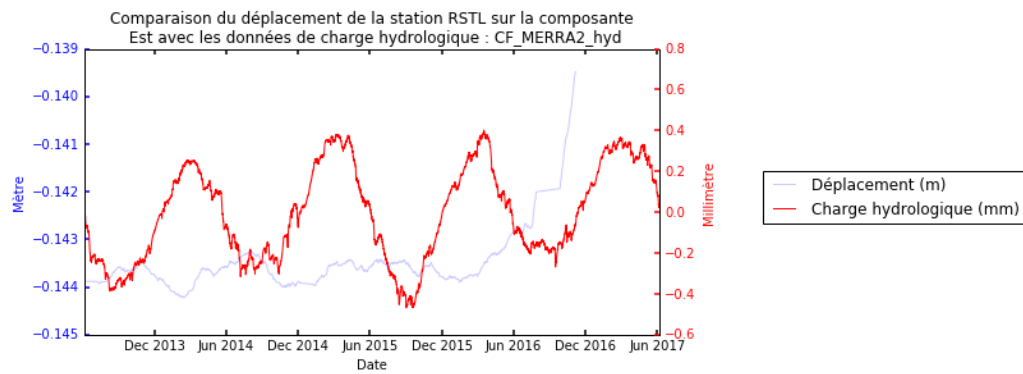
Anti-corrélation :



Déphasage :

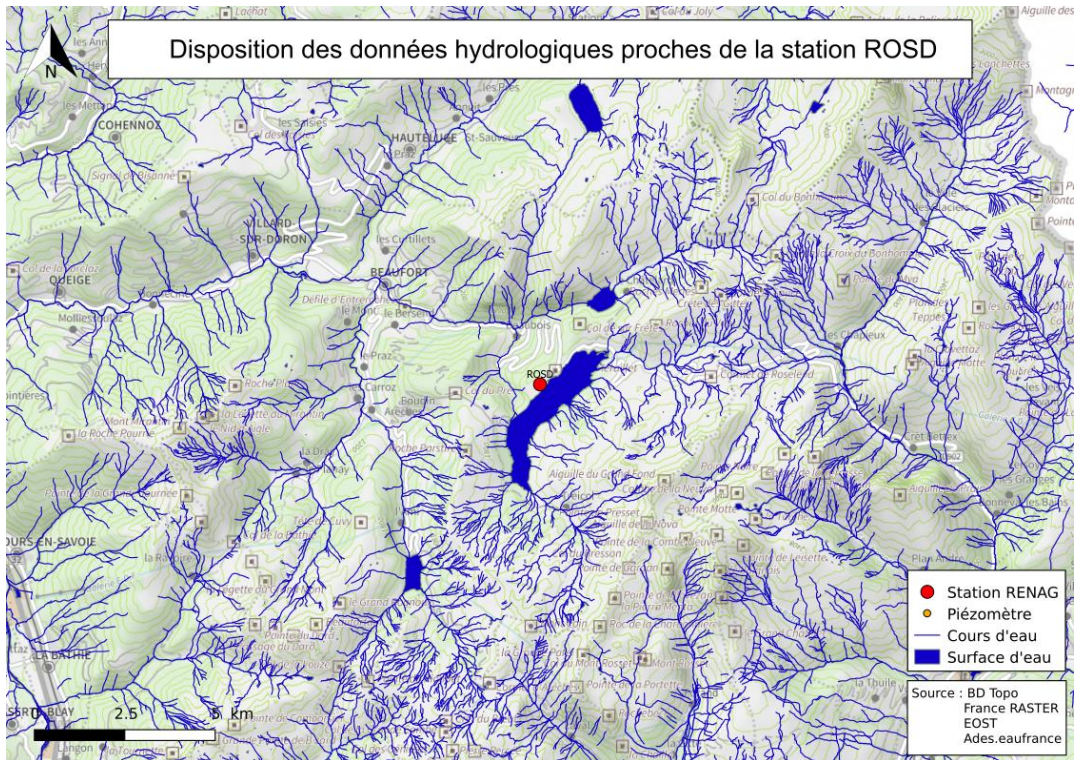


Pas de cohérence :

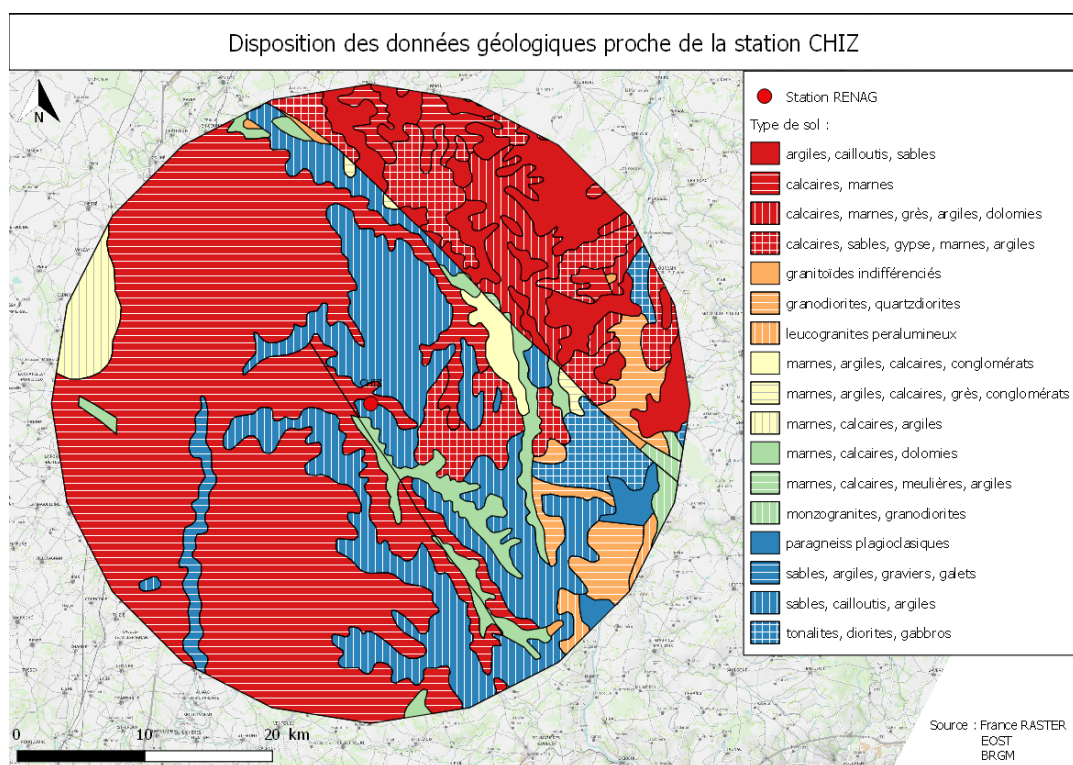
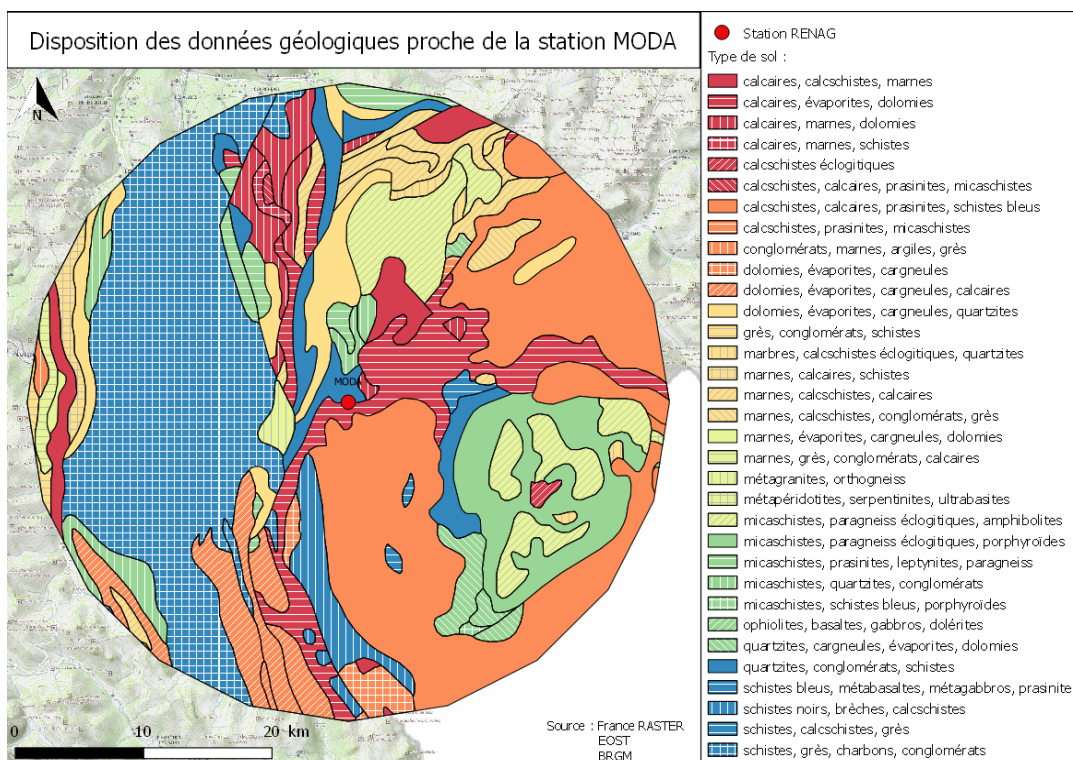


Annexe 10 : Exemple de carte avec les données hydrographiques



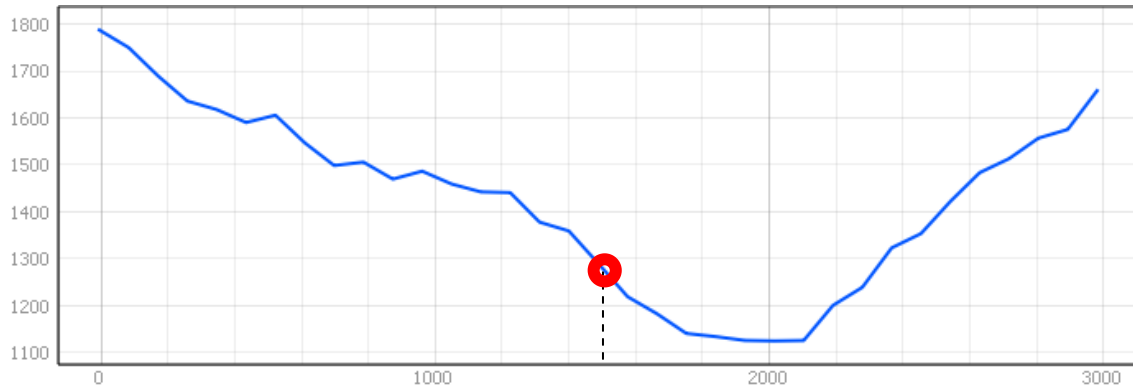


Annexe 11 : Exemple de carte avec les données géologiques



Annexe 12 : Relief station CLAP

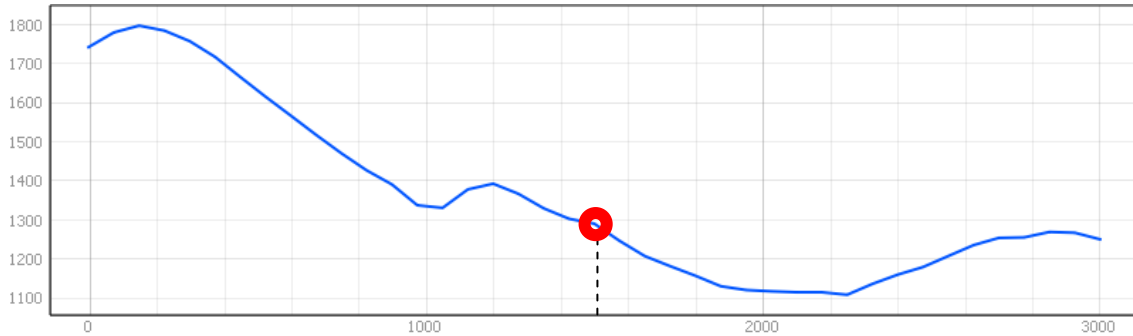
Axes : Sud-Ouest/Nord-Est (Ordonnée : altitude (m), abscisse : coupe (m))



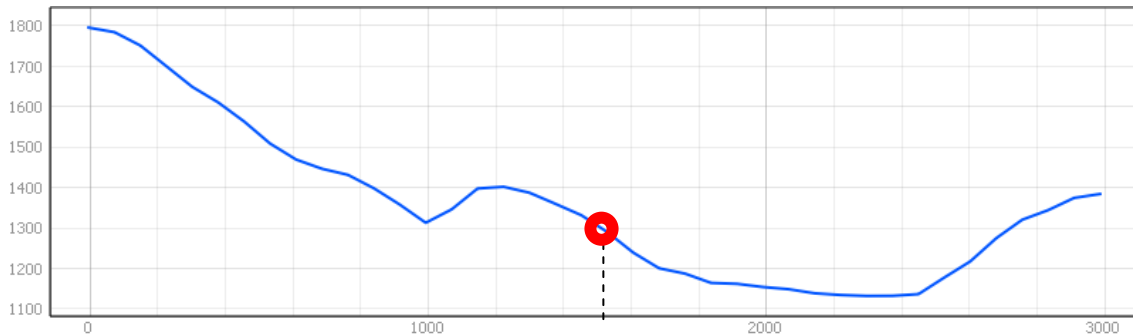
Axes : Sud-Ouest/Nord-Est (Ordonnée : pente (%), abscisse : coupe (m))



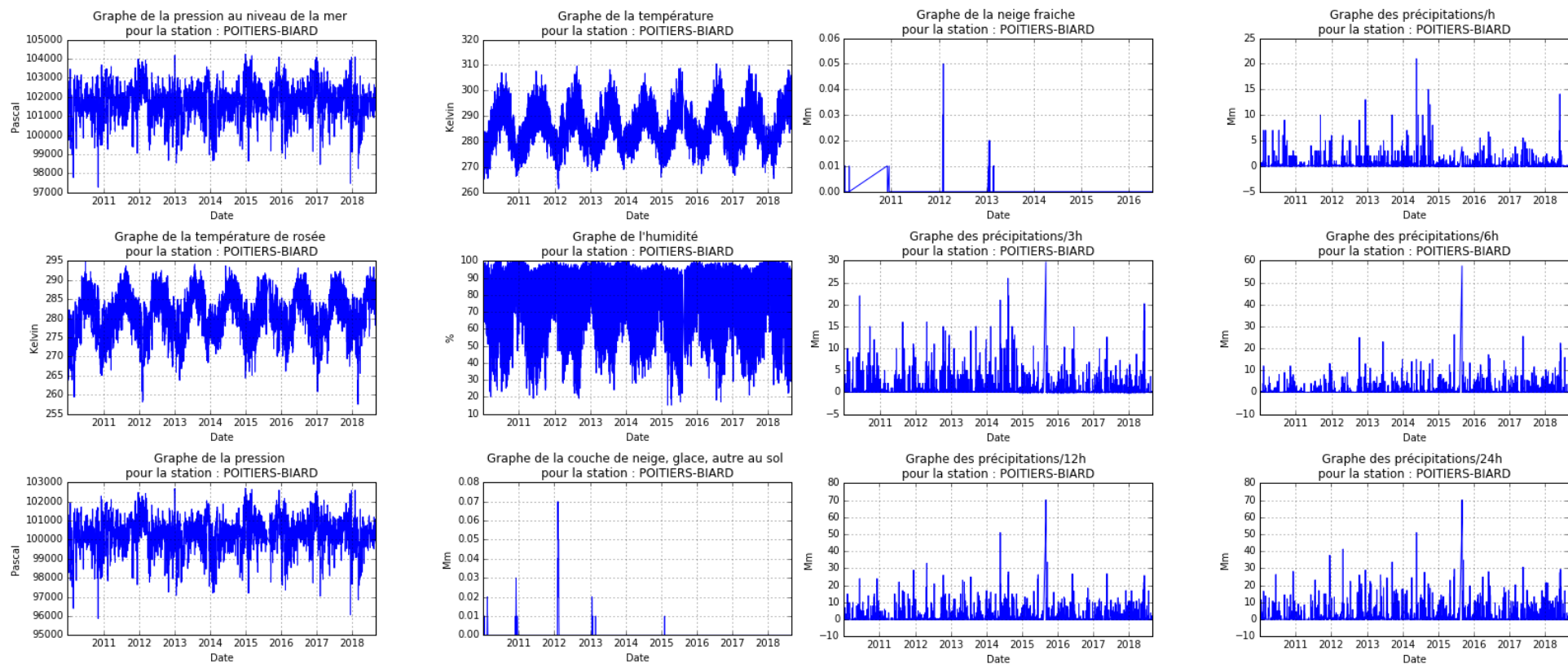
Axes : Ouest-Est (Ordonnée : altitude (m), abscisse : coupe (m))



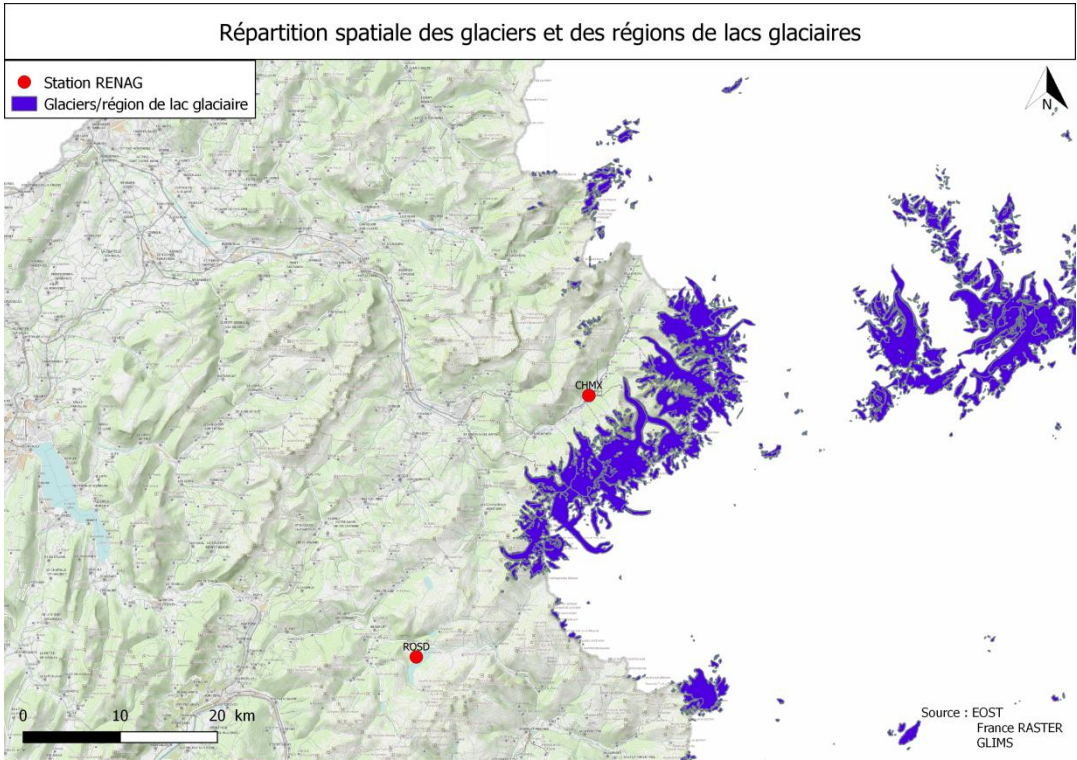
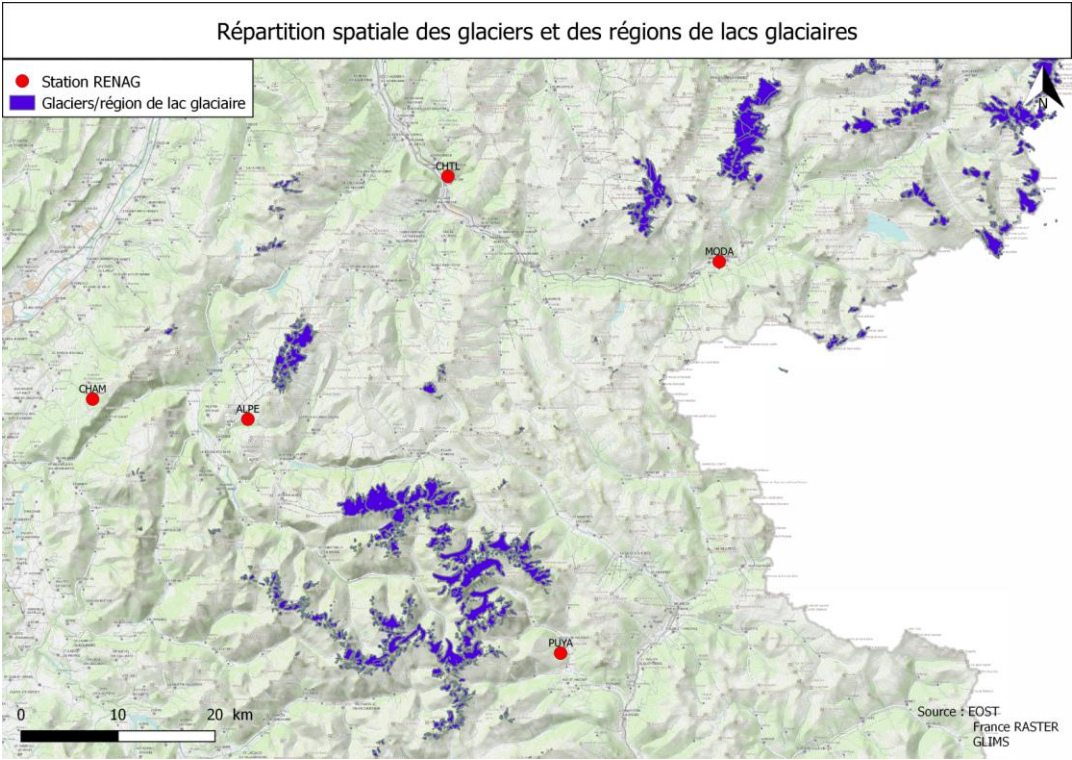
Axes : Sud-Nord (Ordonnée : altitude (m), abscisse : coupe (m))



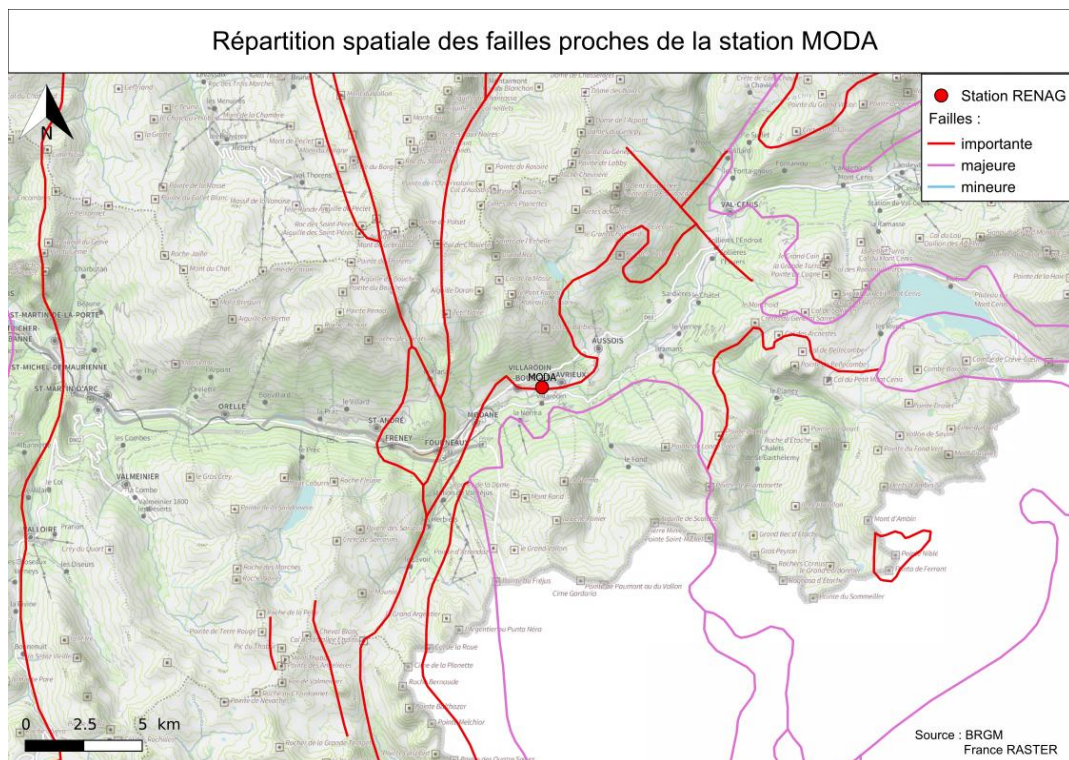
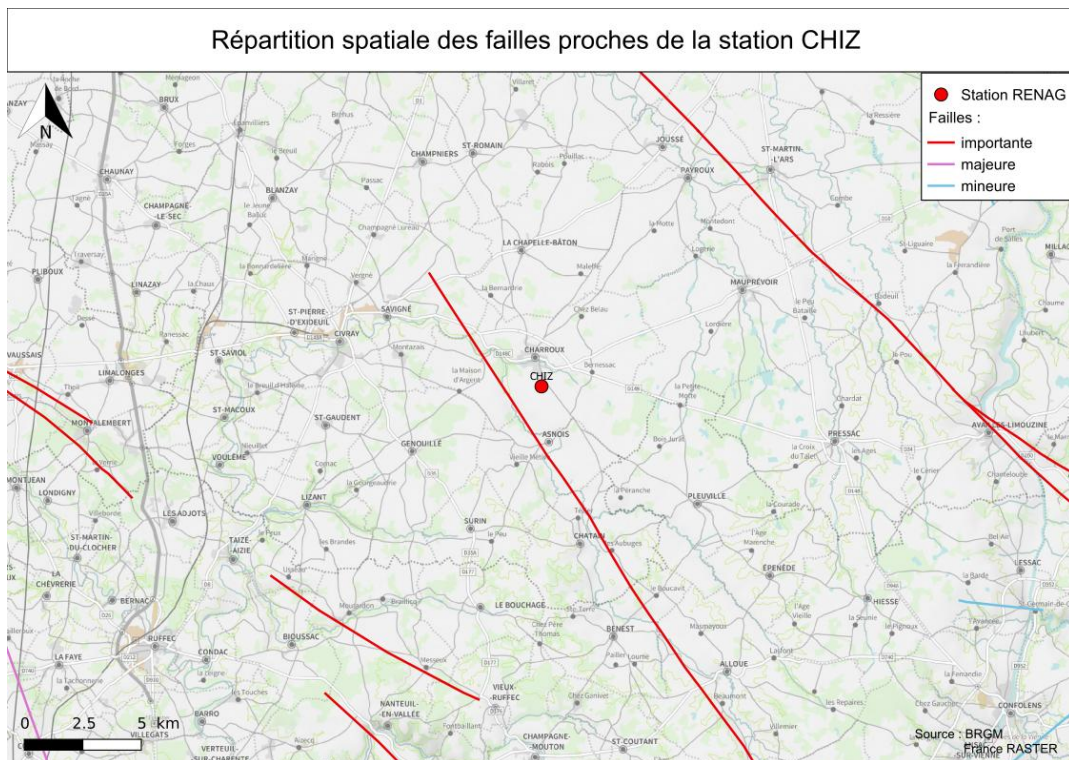
Annexe 13 : Exemple de graphique avec les données météo (station météo proche de la station CHIZ)



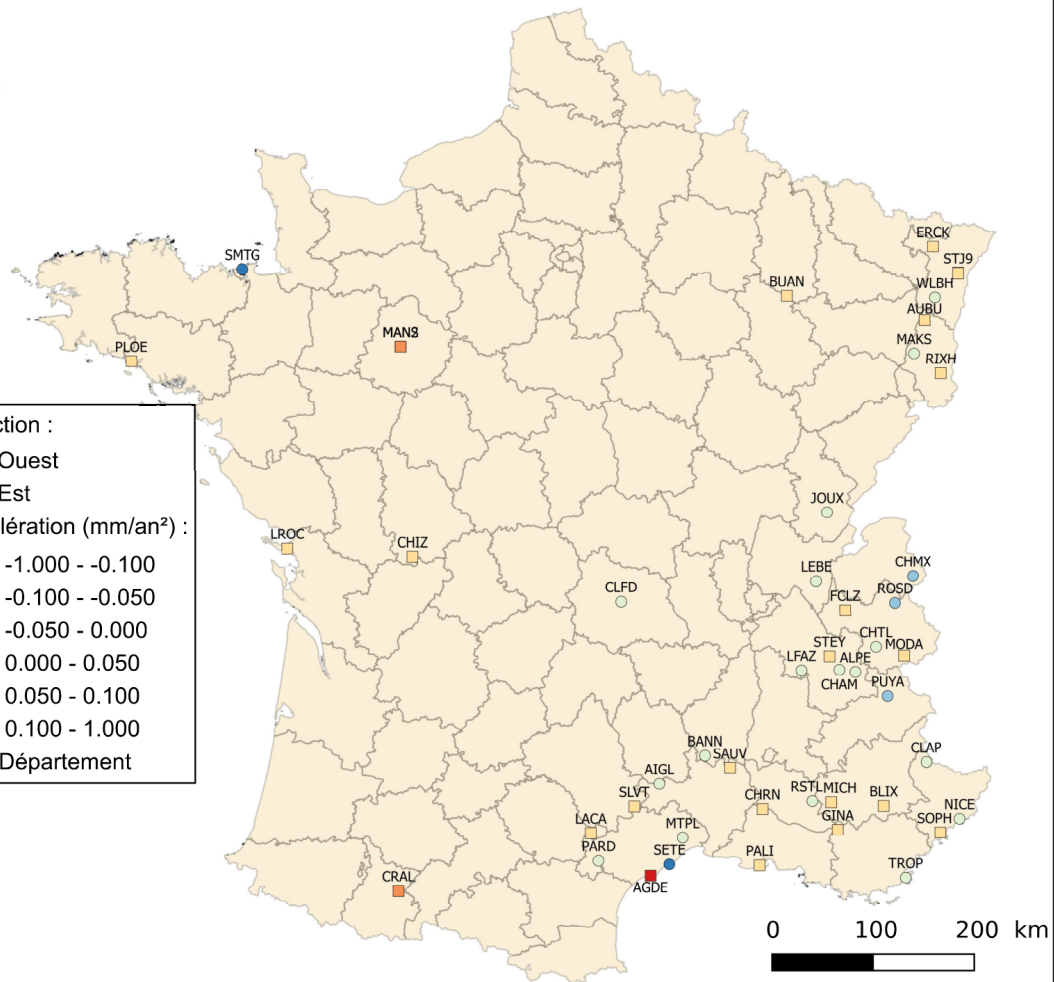
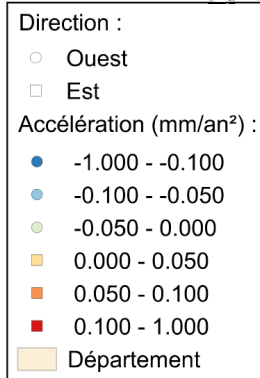
Annexe 14 : Exemple de carte avec les données GLIMS



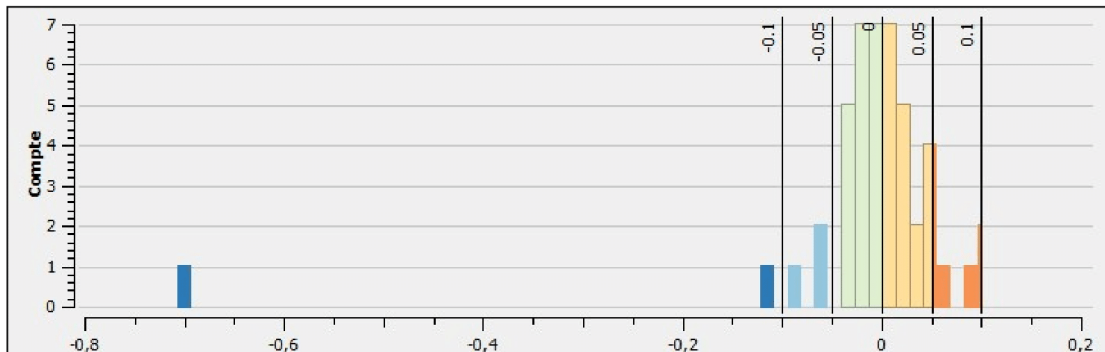
Annexe 15 : Exemple de carte avec la répartition spatiale des failles



Répartition spatiale des accélérations issues de la solution GAMIT (axe Est-Ouest)

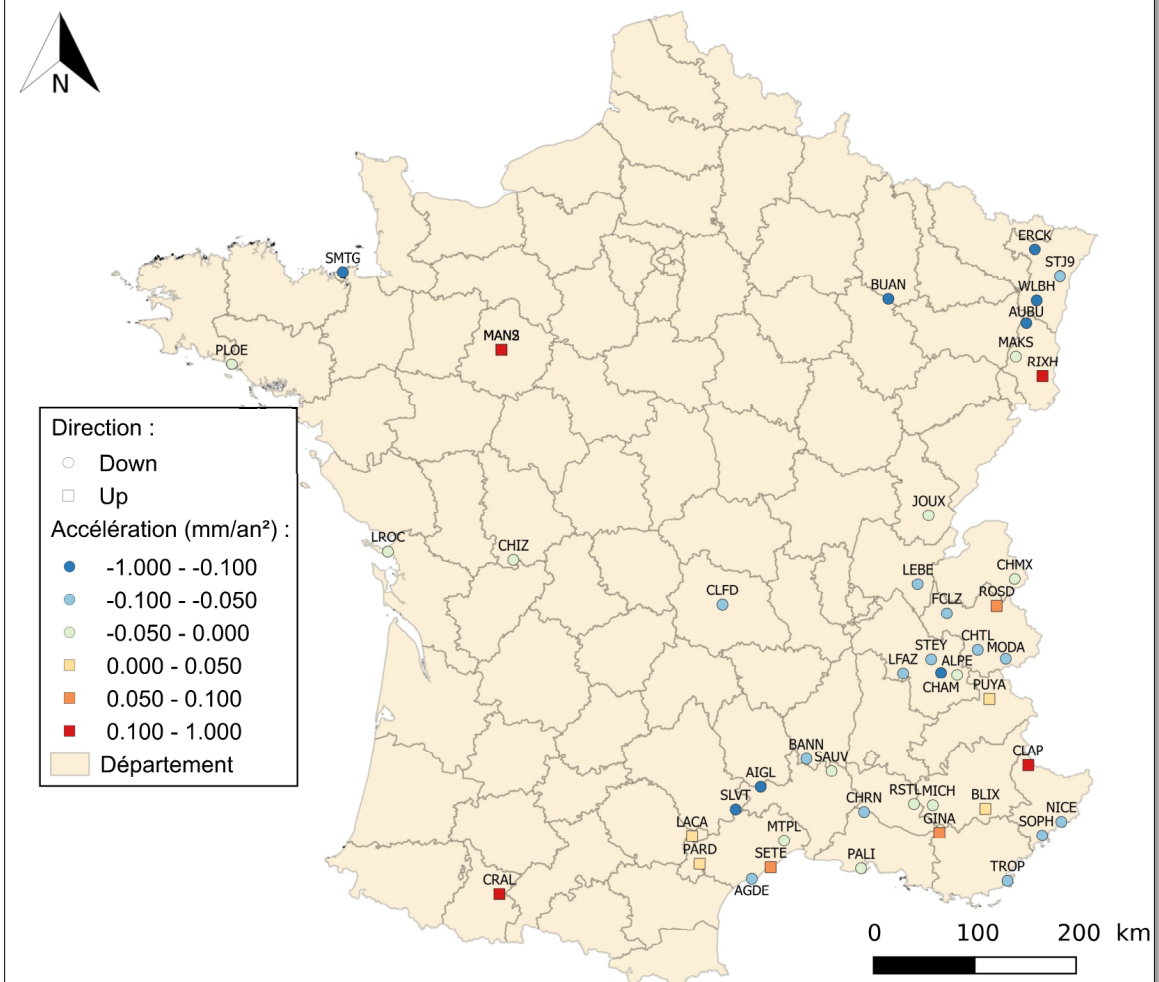


Histogramme de la répartition des accélérations :

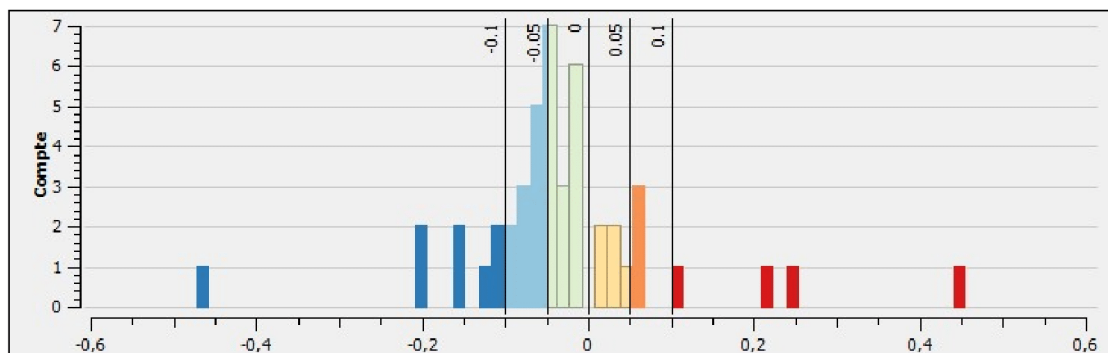


Source : Data.gouv

Répartition spatiale des accélérations issues de la solution GAMIT (axe Up-Down)



Histogramme de la répartition des accélérations :



Source : Data.gouv

Annexe 17 : Tableau général 1^{er} partie

Stations	Coordonnées géographiques			Support station	Date D'installation	Déplacement 2D		Composante Nord		Composante Est		Composante Up
	Latitude (°)	Longitude (°)	Hauteur (m)			Direction	Pente (%)	Accélération (mm/an ²)	Pente (%) S->N	Accélération (mm/an ²)	Pente (%) O->E	Accélération (mm/an ²)
AGDE	43,2963905334	3,4664165974	67,0	Description du support : X Hauteur : X Fondation : Toit station d'épuration Profondeur fondation : X	2007-11-26	Nord-Ouest/ Sud-Est	4%	0,013266	-3%	0,109390	1%	-0,076536
AIGL	44,1213874817	3,5812499523	1618,8	Description du support : Bloc de béton renforcé Hauteur : 2 m Fondation : Bloc de béton renforcé et tiges en acier Profondeur fondation : 4,5 m	2001-06-01	-	-	0,009115	8%	-0,006916	0%	-0,108397
ALPE	45,0866127014	6,0834445953	1892,2	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 2 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2006-10-30	Nord-Est/ Sud-Ouest	-18%	-0,018340	12%	-0,035208	5%	-0,020936
AUBU	48,2168350220	7,1966943741	1151,8	Description du support : Pilier Hauteur : 2 m Fondation : Bloc de béton Profondeur fondation : 1,20 m	2008-07-05	-	-	0,055116	-5%	0,036483	-10%	-0,471967
BANN	44,3691940308	4,1563057899	416,0	Description du support : Pilier en béton Hauteur : X Fondation : Bloc en béton, tiges en acier, toit ... Profondeur fondation : X	2003-07-03	-	-	0,003478	20%	-0,005491	-17%	-0,093539
BLIX	43,8735275269	6,3666944504	1077,1	Description du support : Trépied en acier Hauteur : 0,60 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,15 m	2009-04-24	-	-	-0,074956	25%	0,043702	31%	0,038246
BUAN	48,4861373901	5,3535833359	416,3	Description du support : Pilier en béton Hauteur : X Fondation : X Profondeur fondation : X	2009-07-01	-	-	-0,051474	0%	0,047243	-2%	-0,149914
CHAM	45,1107215881	5,8810834885	1874,6	Description du support : Pilier en béton armée Hauteur : 2,0 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2003-12-19	Nord-Est/ Sud-Ouest	10%	0,035341	3%	-0,021266	18%	-0,148358
CHIZ	46,1334724426	0,4076944590	113,2	Description du support : Mât d'acier Hauteur : 1 m Fondation : Toit en béton, bunker (WW II) Profondeur fondation : X	2000-10-19	Nord-Est/ Sud-Ouest	1%	0,011211	0%	0,000431	0%	-0,019666
CHMX	45,9261665344	6,8730001450	1128,0	Description du support : Mât d'acier Hauteur : 1,80 m Fondation : Toit de bâtiment Profondeur fondation : X	2007-06-29	-	-	-0,034097	0%	-0,091970	0%	-0,034105

CHRN	43,8813629150	4,8621110916	115,2	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 2 m Fondation : Bloc en béton, tiges en acier, toit ... Profondeur fondation : X	2000-10-26	-	-	0,011500	-9%	0,000223	8%	-0,082854
CHTL	45,3041648865	6,3588333130	838,8	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 2 m Fondation : Bloc en béton, tiges en acier, toit ... Profondeur fondation : X	1997-10-14	-	-	0,030983	-5%	-0,018756	3%	-0,054333
CLAP	44,2484436035	6,9270553589	1358,6	Description du support : Tube d'acier sur un pilier en béton Hauteur : 1,5 m Fondation : Bloc en béton, tiges en acier, toit ... Profondeur fondation : X	1990-00-00	Nord-Est/ Sud-Ouest	80%	0,061017	-60%	-0,029076	-38%	0,250624
CLFD	45,7609710693	3,1110832691	474,0	Description du support : Plaque triangulaire inox au dessus d'un tube en acier Hauteur : 3 m Fondation : Mur en béton Profondeur fondation : X	2006-10-17	-	-	-0,035675	0%	-0,030540	0%	-0,095122
CRAL	43,1284179688	0,3671944439	654,0	Description du support : Mât d'acier Hauteur : 1,5 m Fondation : Toit Profondeur fondation : X	2010-02-09	-	-	-0,062248	-1%	0,065530	-1%	0,106266
ERCK	48,8730278015	7,3642220497	290,6	Description du support : Pilier Hauteur : 1,76 m Fondation : Bloc en béton Profondeur fondation : 1 m	2009-03-18	-	-	-0,030249	-10%	0,029183	1%	-0,120875
FCLZ	45,6432228088	5,9856944084	1374,2	Description du support : Pilier en béton Hauteur : X Fondation : X Profondeur fondation : X	1998-06-04	-	-	-0,023324	5%	0,046384	-3%	-0,050115
GINA	43,6755294800	5,7871112823	322,8	Description du support : Plaque en aluminium Hauteur : 1,35 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : X	1998-02-05	Nord-Ouest/ Sud-Est	-10%	0,007411	10%	0,013612	2%	0,058397
JOUX	46,5286941528	5,7958331108	878,9	Description du support : Pilier, plaque en laiton, mât en acier ... Hauteur : X Fondation : Bloc en béton, tiges en acier, toit ... Profondeur fondation : X	2000-04-19	Est/Ouest	-8%	0,003778	-20%	-0,016467	8%	-0,034792
LACA	43,6809997559	2,727555134	1314,0	Description du support : Pilier en béton renforcé Hauteur : 1,2 m Fondation : Bloc en béton renforcé et tiges en acier Profondeur fondation : 1,5 m	2005-06-01	Nord/Sud	-3%	0,013630	1%	0,021019	-5%	0,019969

LEBE	45,9160842896	5,6246390343	940,5	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 1,80 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2005-05-16	-	-	-0,013732	5%	-0,013639	-3%	-0,069634
LFAZ	45,1166381836	5,3990001678	1014,0	Description du support : Pilier en béton armée Hauteur : 1,2 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : X	2005-01-10	-	-	0,007785	5%	-0,018149	2%	-0,065247
LROC	46,1589431763	-1,2193055153	57,9	Description du support : Mât d'acier Hauteur : 1 m Fondation : Toit en béton, bunker (WW II) Profondeur fondation : X	2001-11-23	-	-	0,016693	0%	0,006493	0%	-0,011818
MAKS	47,9230003357	7,0315279961	1236,5	Description du support : Pilier Hauteur : 2 m Fondation : Bloc en béton Profondeur fondation : X	2007-05-01	-	-	0,035391	-2%	-0,028414	-5%	-0,032726
MAN2	48,0186119080	0,1553055495	168,0	Description du support : Mât en inox Hauteur : 2 m Fondation : Toit en béton Profondeur fondation : X	2008-01-23	-	-	-0,077087	-1%	0,102247	-1%	0,018599
MANS	48,0186119080	0,1553055495	168,0	Description du support : X Hauteur : X Fondation : Toit en béton Profondeur fondation : X	1998-04-04	-	-	0,106663	-1%	0,085226	-1%	0,455774
MICH	43,9240570068	5,7175831795	652,9	Description du support : Pilier Hauteur : 2,2 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : X	1998-07-15	-	-	0,006185	5%	0,004269	-9%	-0,041899
MODA	45,2137489319	6,7100553513	1182,3	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 2,2 m Fondation : Plate forme en béton Profondeur fondation : X	1998-10-16	Nord-Ouest/ Sud-Est	1%	-0,017606	-26%	0,023020	-15%	-0,050644
MTPL	43,6374435425	3,8648333549	120,0	Description du support : Pilier en béton renforcé Hauteur : 4 m Fondation : Bloc en béton renforcé et tiges en acier Profondeur fondation : X	1999-04-01	-	-	0,005770	1%	-0,009613	3%	-0,011334
NICE	43,7254981995	7,2999720573	427,3	Description du support : Plaque en aluminium Hauteur : X Fondation : Toit Profondeur fondation : X	2000-12-15	-	-	-0,023211	-5%	-0,024413	0%	-0,076024
PALI	43,3756675720	4,8105001450	107,7	Description du support : Mât Hauteur : 0,114 m Fondation : Toit Profondeur fondation : X	2007-12-06	-	-	-0,003120	0%	0,006926	0%	-0,016100

PARD	43,4313888550	2,8234722614	622,6	Description du support : Pilier en béton renforcé Hauteur : 2 m Fondation : Bloc en béton renforcé et tiges en acier Profondeur fondation : 1 m	2007-05-04	-	-	-0,011477	12%	-0,039336	-5%	0,033232
PLOE	47,7461128235	-3,4273610115	35,3	Description du support : Pilier en béton armé à centrage forcé Hauteur : 2,997 m Fondation : Forage souterrain à 1 m Profondeur fondation : 1 m	2006-12-04	Nord-Ouest/ Sud-Est	-4%	0,033272	1%	0,023557	-3%	-0,014691
PUYA	44,8577232361	6,4792499542	1704,0	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 2 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2005-11-30	Nord-Ouest/ Sud-Est	80%	0,024833	-80%	-0,056575	-45%	0,046085
RIXH	47,7333068848	7,3779997826	376,3	Description du support : Tige en laiton sur un bloc de béton sur un toit Hauteur : X Fondation : Toit Profondeur fondation : X	2011-03-11	-	-	-0,033982	-5%	0,041917	-16%	0,214836
ROSD	45,6914710999	6,6282219887	1702,8	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 1,8 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2005-12-15	Nord-Ouest/ Sud-Est	-3%	0,027622	0%	-0,059894	-24%	0,060742
RSTL	43,9409446716	5,4836945534	1069,8	Description du support : Pilier en béton carré de 0,4 m Hauteur : 2,2 m Fondation : Tiges d'acier Profondeur fondation : 0,4 m	2002-07-26	-	-	-0,013874	10%	-0,003537	0%	-0,044129
SAUV	44,2554435730	4,4675278664	406,4	Description du support : Pilier en béton Hauteur : X Fondation : X Profondeur fondation : X	1999-11-17	-	-	0,016103	12%	0,008554	-15%	-0,047874
SETE	43,3976402280	3,6991112230	53,9	Description du support : Mât en acier Hauteur : 1 m Fondation : Plate forme de port en béton Profondeur fondation : X	2007-10-26	-	-	-0,052730	1%	-0,113029	0%	0,066345
SLVT	43,9198074340	3,2682499890	813,0	Description du support : Pilier en béton renforcé Hauteur : 1,5 m Fondation : Bloc en béton renforcé et tiges en acier Profondeur fondation : X	2006-01-09	Est/Ouest	13%	-0,004347	8%	0,022137	12%	-0,201630
SMTG	48,6410827640	-2,0274722580	57,8	Description du support : Mât Hauteur : X Fondation : X Profondeur fondation : X	2010-02-16	-	-	-0,281569	0%	-0,707420	8%	-0,205478
SOPH	43,6113891602	7,0544443130	193,3	Description du support : Mât Hauteur : X Fondation : Toit Profondeur fondation : X	2001-01-12	-	-	0,029330	1%	0,022224	-5%	-0,062067

STEY	45,2352218628	5,7617778778	1394,9	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 1,5 m Fondation : Bedrock Profondeur fondation : 0,5 m	2003-05-27	-	-	0,008979	50%	0,001974	25%	-0,051558
STJ9	48,6216659546	7,6838054657	237,2	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 1,5 m Fondation : Bunker en béton Profondeur fondation : X	1999-11-06	-	-	0,010882	0%	0,001373	3%	-0,065287
TROP	43,2194709780	6,6009998320	369,5	Description du support : Pilier en béton carré de 0,4 m Hauteur : 1,2 m Fondation : Tiges en acier Profondeur fondation : 0,4 m	2005-06-02	-	-	0,050711	6%	-0,006560	10%	-0,064177
WLBH	48,4151649475	7,3513054848	819,1	Description du support : Pilier en béton Hauteur : 1,5 m Fondation : Tiges en acier Profondeur fondation : 0,4 m	2000-10-16	-	-	0,025188	-2%	-0,017914	-20%	-0,114656

Annexe 18 : Tableau général 2^{ème} partie

Stations	Géologie		Température (moyenne glissante sur 15 jours)		Données hydrographiques	Failles dans un rayon de 5 km	Glacier à proximité
	Type de sol	Formation géologique proche (rayon de 500 m)	Données météo / ID / hauteur (m) / distance (m)	Coefficient de corrélation			
AGDE	basanites, hawaïtes, benmoréites, téphrites	450 m au Sud et Est = sables, argiles, graviers, galets			2 km au sud = mer méditerranée 500 m à l'Ouest = l'Hérault 7,5 km au Nord-Est = étang de Thau	-	-
AIGL	schistes, micaschistes, quartzites	-			Multiple cours d'eau	✓	-
ALPE	monzogranites, granodiorites	-			5,5 km au Nord-Ouest = Lac du Verney 6,3 km au Sud-Est = Lac du Chambon + multiple cours d'eau	✓	4,5 km au Nord-Est
AUBU	leucogranites peralumineux	110 m au Nord = paragneiss, micaschistes, quartzites	Données météo : M1 ID : STRASBOURG-ENTZHEIM Distance = 50 km	- Composante Nord : -0,20 - Composante Est : -0,07 - Composante Up : 0,09	Multiple cours d'eau	✓	-
BANN	marnes, sables, grès, argiles, calcaires	280 m à l'Ouest = marnes, calcaires, argiles 350 au Sud = dolomies, marnes, évaporites			Multiple cours d'eau	✓	-
BLIX	conglomérats, marnes, argiles, grès	360 m à l'Ouest = marnes, grès, schistes, calcaires	Données météo : M2	- Composante Nord : -0,43 - Composante Est : 0,49 - Composante Up : 0,08	12,3 km au Sud-Ouest = Lac de Sainte-Croix 12,7 km à l'Est = Lac de Castillon + multiple cours d'eau	✓	-
BUAN	marnes, calcaires, argiles, sables	-	Données météo : M1 ID : NANCY-OCHEM Distance = 46 km	- Composante Nord : -0,25 - Composante Est : -0,15 - Composante Up : 0,16	Multiple cours d'eau	-	-
CHAM	amphibolites, métagabbros, serpentinites	-			13,2 km à l'Est = Lac du Verney 10,6 km au Nord-Ouest = L'Isère 10,9 km au Sud-Est = Lac Mort + multiple cours d'eau	✓	19 km à l'Est
CHIZ	sables, cailloutis, argiles	110 m au Nord-Est = calcaires, marnes	Données météo : M1 ID : POITIERS-BIARD Distance = 50 km	- Composante Nord : 0,66 - Composante Est : 0,69 - Composante Up : 0,18	Multiple cours d'eau	✓	-
CHMX	marnes, calcaires, schistes	210 m au Sud-Est = marnes, évaporites, cargneules, dolomies 410 m au Nord-Ouest = marnes, schistes noirs, calcaires			Multiple cours d'eau	✓	3 km à l'Est 4 km au Sud
CHRN	marnes, sables, grès, argiles, calcaires	300 m au Nord = sables, argiles, graviers, galets	Données météo : M1 ID : MARIGNANE Distance = 57 km	- Composante Nord : -0,18 - Composante Est : 0,23 - Composante Up : 0,02	3 km au Nord = La Durance 13,6 km à l'Ouest = Le Rhône + multiple cours d'eau	-	-

CHTL	conglomérats, marnes, argiles, grès	310 m au Nord-Est = calcaires, calcschistes, marnes 230 m au Sud-Ouest = calcaires, calcschistes, marnes			1,6 km au Sud = Lac + multiple cours d'eau	✓	20 km à l'Est 20 km au Sud-Ouest
CLAP	migmatites, amphibolites, leptynites	115 m au Sud-Ouest = marnes, évaporites, cargneules, dolomies	Données météo : M2	- Composante Nord : -0,27 - Composante Est : -0,31 - Composante Up : -0,22	5 km au Nord-Est = Lac de Rabuons, lac de Fer ... + multiple cours d'eau	✓	-
CLFD	basanites, hawaïtes, téphrites	-	Données météo : M1 ID : CLERMONT-FD Distance = 5 km	- Composante Nord : 0,14 - Composante Est : 0,16 - Composante Up : -0,16	Multiple cours d'eau	-	-
CRAL	sables, cailloutis, galets, argiles	-			Multiple cours d'eau	✓	-
ERCK	grès, conglomérats, quartzites	-	Données météo : M1 ID : STRASBOURG-ENTZHEIM Distance = 41 km	- Composante Nord : -0,11 - Composante Est : -0,02 - Composante Up : 0,19	Multiple cours d'eau	✓	-
FCLZ	marnes, calcaires, conglomérats, grès	440 m à l'Est, 480 m au Nord et 450 m à l'Ouest = calcaires récifaux, faciès urgonien			7 km à l'Ouest = Lac du Bourget 16 km au Sud-Ouest = Lac d'Aiguebelette + multiple cours d'eau	✓	-
GINA	marnes, sables, grès, argiles, calcaires	-	Données météo : M1 ID : MARGINANE Distance = 54 km	-	5 km au Nord-Ouest = Bassin d'Eclusées de Cadarache 6 km au Nord-Ouest = La Durance 14 km au Nord-Est = Lac d'Esparron + multiple cours d'eau	✓	-
JOUX	marnes, schistes noirs, calcaires	-	-	-	7,4 km à l'Ouest = L'Ain 7,3 km au Nord-Ouest = Le Grand et Petit Lac 2,3 km au Sud-Est = Le Grand et Petit Lac 8,3 km à l'Est = Lac de l'Abbaye 8,5 km au Nord-Est = Lac de Bonlieu + multiple cours d'eau	✓	-
LACA	migmatites paradérivées	280 m au Nord-Ouest et 350 m au Sud-Est = monzogranites, granodiorites	Données météo : M1 ID : MILLAU Distance = 54 km	- Composante Nord : -0,02 - Composante Est : 0,08 - Composante Up : 0,15	4,2 km au Sud-Est = Lac du Laouzas 10 km au Sud-Ouest = L'Agout + multiple cours d'eau	✓	-
LEBE	marnes, schistes noirs, calcaires	-	Données météo : M1 ID : LYON-ST EXUPERY Distance = 47 km	- Composante Nord : 0,05 - Composante Est : 0,14 - Composante Up : 0,10	3,8 km au Nord-Ouest = Plan d'eau des Lésines 15,9 km au Sud-Est = Le Rhône + multiple cours d'eau	✓	-
LFAZ	calcaires récifaux, faciès urgonien	170 m à l'Ouest = marnes, grès, schistes, calcaires	-	-	3,8 km au Nord-Ouest = L'Isère + multiple cours d'eau	✓	-
LROC	argiles, grès, calcaires	300 m à l'Est = marnes, calcaires, argiles	Données météo : M1 ID : PTE DE CHASSIRON Distance = 20 km	- Composante Nord : -0,49 - Composante Est : -0,09 - Composante Up : 0,14	1,5 km = Océan atlantique + multiple cours d'eau	-	-

MAKS	schistes, métawackes, grès	60 au Sud = ultrabasites, péridotites, serpentinites	Données météo : M1 ID : BALE-MULHOUSE Distance = 49 km	- Composante Nord : -0,17 - Composante Est : 0,02 - Composante Up : 0,21	1,5 km au Nord = Lac de La Lauch 5 km à l'Est = Lac du Ballon 6,3 km au Nord-Ouest = Lac de Kruth-Wildenstein + multiple cours d'eau	✓	-
MAN2	craies, calcaires, marnes, tuffeaux, sables	-	Données météo : M1 ID : ALENCON Distance = 47 km	- Composante Nord : 0,15 - Composante Est : 0,30 - Composante Up : 0,22	Multiple cours d'eau	✓	-
MANS	craies, calcaires, marnes, tuffeaux, sables	-	Données météo : M1 ID : ALENCON Distance = 47 km	-	Multiple cours d'eau	✓	-
MICH	marnes, grès, conglomérats, calcaires	50 m au Sud-Est = marnes, conglomérats, grès, calcaires	-	-	3 km au Nord-Est = Retenue de la Laye 14 km à l'Est = La Durance + multiple cours d'eau	-	-
MODA	quartzites, conglomérats, schistes	80 m au Sud = calcaires, évaporites, dolomies	-	-	3,6 km au Nord = Plan d'Amont/d'Aval 10,7 km au Sud-Ouest = Lac de Bissorte 10 km au Sud-Est = Lago di Rochemolles + multiple cours d'eau	✓	8 km au Nord 8 km au Nord-Ouest
MTPL	marnes, calcaires, argiles	100 m au Sud = marnes, grès, conglomérats, calcaires	Données météo : M1 ID : MONTPELLIER Distance = 10 km	- Composante Nord : -0,41 - Composante Est : -0,08 - Composante Up : 0,03	12 km au Sud-Est = Étang de l'Or 10 km au Sud-Est = Étang du Méjean 14 km au Sud-Est = Mer Méditerranée + multiple cours d'eau	✓	-
NICE	marnes, grès, conglomérats, calcaires	230 m au Sud = marnes, schistes noirs, calcaires	Données météo : M1 ID : NICE Distance = 11 km	- Composante Nord : -0,28 - Composante Est : 0,14 - Composante Up : -0,02	2,5 km au Sud-Est = Mer Méditerranée 9,5 km à l'Ouest = Le Var + multiple cours d'eau	✓	-
PALI	sables, argiles, graviers, galets	210 m au Sud-Ouest = vases, limons	Données météo : M1 ID : MARGINANE Distance = 33 km	- Composante Nord : -0,02 - Composante Est : -0,30 - Composante Up : -0,08	100 m à l'Est du Rhône + multiple cours d'eau/étang	-	-
PARD	schistes, grès, calcaires, quartzites	-	-	-	Multiple cours d'eau	✓	-
PLOE	micaschistes, paragneiss, amphibolites	110 m au Sud = leucogranites peralumineux	Données météo : M1 ID : BELLE ILE-LE TALUT Distance = 50 km	- Composante Nord : -0,42 - Composante Est : 0,11 - Composante Up : -0,35	4,2 km à l'Ouest = Étang de Lannéec 3 km au Sud-Est = Étang du Ter + multiple cours d'eau	-	-
PUYA	calcaires, calcschistes, marnes	360 m au Nord-Ouest = grès, conglomérats, schistes	Données météo : M2	- Composante Nord : -0,44 - Composante Est : -0,36 - Composante Up : -0,01	Multiple cours d'eau	✓	6 km à l'Ouest 6 km au Nord
RIXH	marnes, conglomérats, grès	-	Données météo : M1 ID : BALE-MULHOUSE Distance = 16 km	- Composante Nord : 0,22 - Composante Est : 0,24 - Composante Up : 0,03	Multiple cours d'eau	-	-
ROSD	marnes, évaporites, cargneules, dolomies	270 m au Nord-Ouest = migmatites, amphibolites, leptynites	-	-	240 m à l'Est = Lac de Roselend 2,6 km au Nord-Est = Lac de la Gittaz 7,2 km au Nord-Est = Lac de la Girotte 5,8 km au Sud-Ouest = Lac de Saint-Guéryn + multiple cours d'eau	✓	13 km au Nord-Est

RSTL	calcaires récifaux, faciès urgonien	-	-	-	Multiple cours d'eau	✓	-
SAUV	calcaires, marnes, conglomérats, grès	-	Données météo : M1 ID : MONTELIMAR Distance = 42 km	- Composante Nord : -0,36 - Composante Est : 0,12 - Composante Up : -0,01	Multiple cours d'eau	✓	-
SETE	marnes, conglomérats, grès, calcaires	428 m à l'Ouest = marnes, calcaires, argiles 240 m au Sud = sables, cailloutis, vases	Données météo : M1 ID : MONTPELLIER Distance = 30 km	- Composante Nord : -0,32 - Composante Est : 0,56 - Composante Up : 0,03	3,5 km à l'Ouest = Etang de Thau 6 km au Nord-Est = Etang de Vic 150 m au Sud = Mer Méditerranée + multiple cours d'eau	-	-
SLVT	calcaires, marnes, argiles, dolomies	90 m au Sud = calcaires, marnes, dolomies			Multiple cours d'eau	✓	-
SMTG	migmatites paradérivées	-	-	-	500 m au Nord = La Manche + multiple cours d'eau	✓	-
SOPH	calcaires, marnes, dolomies	-			7,2 km au Sud et 6 km à l'Est = Mer Méditerranée + multiple cours d'eau	-	-
STEY	marnes, schistes noirs, calcaires	-	-	-	Multiple cours d'eau	-	-
STJ9	argiles, sables, graviers, galets	330 m à l'Ouest = marnes, conglomérats, grès	Données météo : M1 ID : STRASBOURG-ENTZHEIM Distance = 8 km	- Composante Nord : 0,07 - Composante Est : 0,32 - Composante Up : 0,01	10 km à l'Est = Le Rhin + multiple cours d'eau	✓	-
TROP	paragneiss antectiques	-	-	-	5 km au Nord = Golfe de St Tropez 5 km à l'Est et 4,5 km au Sud = Mer Méditerranée	✓	-
WLBH	diorites, gabbros	440 m à l'Est = leucogranites sodi-potassiques	Données météo : M1 ID : STRASBOURG-ENTZHEIM Distance = 26 km	- Composante Nord : 0,23 - Composante Est : 0,25 - Composante Up : 0,21	Multiple cours d'eau	✓	-

Annexe 19 : Tableau général données piézométriques

Stations :	Piézomètre :	Profondeur D'investigation	Durée D'observation	Géologie station	Géologie piézomètre en surface	Distance (station-piézomètre)	Coefficient de Corrélation
AGDE	10403X0115/S	126 m	15/03/1987 – 18/03/2019	basanites, hawaïtes, benmoréites, téphrites		300 m	Pas assez de mesure
BUAN	02653X0001/F1	67 m	07/03/1974 – 15/07/2019	marnes, calcaires, argiles, sables		7 500 m	-0,12
CHIZ	06385X0069/CHA205	166 m	25/01/1996 – 25/01/2019	sables, cailloutis, argiles		3 500 m	0,04
CHRN	09663X0260/PA5	9 m	01/01/1986 – 21/07/2019	marnes, sables, Grès, argiles, calcaires	sables, argiles, Gravier, galets	3 000 m	0,15
MAN2	03586X0145/P2	12 m	19/06/1993 – 12/09/2016	craies, calcaires, marnes, tuffeaux, sables		7 000 m	-0,14
MTPL	09908X0174/MASJAU	13 m	15/10/1974 – 14/07/2019	marnes, calcaires, argiles	sables, marnes, argiles	3 800 m	0,17
RIXH	04136X0199/M107	15 m	19/01/1976 – 28/09/2018	marnes, conglomérats, grès	sables, argiles, graviers, galets	3 500 m	0,52
STJ9	02346X0045/245N	23 m	24/09/1985 – 12/03/2019	argiles, sables, graviers, galets		2 800 m	0,40

Analyse des mouvements transitoires dans les séries temporelles du RENAG : signal environnemental ou méthodologique ?

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2019

RESUME

Des signaux transitoires long terme (ne correspondant pas aux signaux saisonniers) sont visibles dans les séries temporelles des stations du RENAG sur une longue période d'acquisition (10 à 20 ans de mesure). Quatre solutions GNSS différentes vont permettre de les identifier et de montrer qu'ils sont bien d'origine environnementale et non méthodologique.

Des corrélations/anti corrélations entre les modèles de surcharges hydrologiques réalisées par l'EOST et les déplacements annuels des stations permettent d'identifier deux réponses : la réponse élastique de la Terre à la surcharge hydrologique et la poroélasticité.

Pour expliciter les signaux transitoires long terme, des corrélations ont pu être établies dans certains cas avec des longues séries d'observation de paramètres environnementaux (piézomètres, pluviomètres, températures ...).

Mots clés : Signaux transitoires, surcharge, déformations, modèle hydrologique.

SUMMARY

Long-term transient signals (not corresponding to seasonal signals) are visible in the time series of RENAG stations over a long acquisition period (10 to 20 years of measurement). Four different GNSS solutions identify them and show that they are of environmental and not methodological origin.

Correlation / anti correlation between the hydrological loading models carried out by the EOST and the annual displacements of the stations identify two responses: the elastic response of the Earth to the hydrological loading and the poroelasticity.

Long-term transient signals can be explained in some cases by correlation with long series of observations of environmental parameters (piezometers, rain gauges, temperature ...).

Key words: Transient signals, loading, deformations, hydrological model.