

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| I. Introduction | 2 |
| II. Etat de l'art | 3 |
| 1. Techniques conventionnelles de suivi de glissements | 3 |
| 2. L'outils GPS | 5 |
| 3. Objectifs de l'étude | 12 |
| III. Méthodologie | 12 |
| 1. Présentation de GINS | 12 |
| 2. Méthodologie envisagée | 14 |
| VI. Sites d'étude et données d'observations | 16 |
| 1. Le site de Villerville | 16 |
| 2. Le site de La Valette | 17 |
| 3. Le site de La Clapière | 18 |
| 4. Le site de Super-Sauze | 19 |
| 5. Le site de Mas d'Avignonet | 20 |
| V. Resultats obtenus et Analyses | 22 |
| 1. Résultats PPP avec une solution journalière | 22 |
| 2. Résultats PPP avec une solution horaire | 27 |
| 3. Résultats I-PPP avec une solution horaire | 31 |
| 4. Résultats de traitements différentiels avec GINS | 35 |
| 5. Résultats obtenus par différence de solution I-PPP | 36 |
| 6. Analyse des oscillations | 38 |
| VI. Conclusion | 42 |
| VII. Remerciements | 44 |
| VIII. Table des illustrations | 45 |
| IX. Références | 46 |
| X. Poster scientifique | 49 |

I. Introduction

L'analyse et la compréhension de la dynamique des glissements de terrain constituent un enjeu fondamental en matière de prévention des risques naturels. En effet, un grand nombre de régions (en France et à travers le monde) comportent des zones fortement instables qui rendent vulnérables les infrastructures alentours.

Cette étude se déroule à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg. Plusieurs branches composent l'EOST : l'enseignement, les services d'observation et la recherche. La partie enseignement se divise en une Ecole d'ingénieur en géophysique, une Licence Sciences de la terre, de l'Univers et de l'Environnement, un Master Sciences de la Terre et de l'Environnement, et une Ecole doctorale Sciences de la Terre et de l'Environnement. Cette partie se retrouve sous la tutelle de l'Université de Strasbourg. Ensuite, les services d'observation ont pour mission d'acquérir des données en sismologie, géodésie, gravimétrie, magnétisme ou environnement. Ce département est aussi rattaché à l'université mais aussi à l'Institut National des Sciences de l'Univers dépendant du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Enfin, le département recherche est sous la même tutelle que ce service d'observation et se divise en deux parties, à savoir l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) et le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg. Il faut savoir que l'EOST est un des partenaires de l'Observatoire Multi-disciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV). Ce stage se déroule au sein de l'EOST pour l'OMIV et durant une semaine au CNES de Toulouse.

L'observation des déplacements en surface représente le moyen le plus simple et le plus utilisé pour la surveillance des zones de glissement. Le développement et la standardisation fulgurants au cours des deux dernières décennies de l'outil GPS (*Global Positioning System*) ont permis d'accroître considérablement les potentialités de mesures de positionnement. La facilité d'acquisition et la précision se sont trouvées accrues et un enregistrement automatique et continu s'est avéré possible. Les résultats des mesures GPS pour l'étude des glissements de terrain sont rentables et efficaces du point de vue des temps et coûts de mesure ainsi que des délais d'accès aux données, par rapport aux autres moyens habituellement utilisés. Cet outil permet de recueillir une quantité importante de données, en particulier lors de l'installation de stations permanentes. Une longue série du déplacement au niveau de points d'un glissement de terrain améliore la connaissance de la cinématique de la zone sur le long terme.

L'OMIV a plusieurs missions dont celle d'évaluer précisément les mouvements de glissements de terrain sur certains sites français. Ces sites sont au nombre de 5 : Super-Sauze, la Clapière, la Valette (Alpes-de-Haute-Provence), Mas d'Avignonet (Rhône-Alpes), et Villerville (Basse-Normandie). La surveillance de ces sites est essentielle pour comprendre les mécanismes des glissements de terrain, et prédire leur comportement dans le temps et l'espace. Les scientifiques de l'observatoire ont choisi ces glissements afin d'en apprendre plus sur les processus physiques qui déclenchent ces mouvements de terrain et les modèles hydro-mécaniques de déformation de pente.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la solution GPS d'un traitement non différentiel (par positionnement ponctuel précis) en utilisant GINS afin d'obtenir un suivi continu des glissements de terrain cités ci-dessus. Il sera expliqué plus en détail dans une première partie où l'état de l'art des méthodes d'observations de la cinématique des glissements sera présenté. Quelques rappels concernant les mesures GNSS y seront décrits. La deuxième partie comporte la méthodologie appliquée lors de cette travail. Puis, dans un troisième temps, les sites choisis pour l'expérimentation du logiciel GINS à travers la méthode du positionnement ponctuel précis seront présentés. Pour finir, les résultats obtenus seront mis en évidence dans une quatrième et dernière partie.

II. Etat de l'art

Qu'il s'agisse de glissements de terrain, d'éboulements ou encore de coulées boueuses, on est cependant toujours en présence de déplacements gravitaires d'un volume de roche ou de sols déstabilisés sous l'effet de sollicitations naturelles (forte pluie, cycle gel/dégel, seisme, fonte des neiges...) ou anthropiques (terrassement ou déboisement par exemple). Comme l'explique Benouis (2010) dans son étude, ces phénomènes évoluent irrégulièrement dans le temps, passant par des phases d'évolution lente à des phases plus ou moins rapides qui peuvent parfois être à l'origine de conséquences graves. La vitesse de déplacement des différents phénomènes permet de distinguer deux grands ensembles de mouvements de terrain : les mouvements lents et continus et les mouvements rapides et discontinus. Les premiers subissent une déformation progressive, parfois accompagnée de rupture d'accélération légère. Les seconds sont généralement des phénomènes de fluage et de glissements qui peuvent être divisés en deux autres sous-groupes selon leur mode de propagation des matériaux : en masse lorsqu'il s'agit de matériaux rigides (roche) ou à l'état remanié quand il s'agit de matériaux meubles (argile). Ce sont les chutes de pierre et blocs rocheux, les éboulements, et les coulées boueuses.

Les causes de ces mouvements de terrain sont généralement multiples et combinées. Ces derniers résultent d'un changement de l'équilibre des forces dans le versant à la suite de processus physiques et/ou chimiques qui, à leur tour, dépendent de différents facteurs. Ainsi, le processus d'altération agissant à long terme conduit à une diminution des forces résistantes, ainsi qu'à des fluctuations de la nappe phréatique qui influencent la stabilité d'un versant de manière continue. La pente peut aussi déstabiliser un versant rapidement, soit à la suite de l'érosion par une rivière au pied du versant, soit en cas de fort changement de conditions climatiques (Oswald, 2003) soit dans des cas plus rares, après un tremblement de terre. En général, l'eau joue un rôle déterminant pour les mouvements de terrain.

1. Techniques conventionnelles de suivi des déplacements

Les terrains favorables aux glissements ont été le sujet de nombreuses études ayant pour objectif de caractériser leur cinématique. Pour analyser ces phénomènes, une multitude de techniques ont été mises en place depuis plusieurs années : télédétection (LiDAR), études géomorphologiques, géologiques, hydrologiques, sismologiques, suivi cinématique (Deprez, 2010)...

Ce projet porte sur le suivi cinématique, beaucoup de techniques sont à disposition :

| Méthode | Utilisation | Mesure | Etendue de mesure | Précision |
|---|------------------------------------|------------|-------------------|----------------|
| Mesures Ponctuelles | | | | |
| Nivelle à vis micrométrique | déplacement angulaire en surface | da | 0,125 rad | 0,0004 rad |
| Fissuromètre à pige centrale | mouvement de compartiments | dD | < 20 mm | ± 0,1 mm |
| Mire à vernier | ouverture de petites fissures | dD | < 200 mm | ± 0,5 mm |
| Extensomètre à base courte | ouverture de fissures | dD | 25 - 450 mm | ± 0,1 mm |
| Extensomètre à base longue en fil d'invar | déplacement de points mobiles | dD | jusqu'à 100 m | ± 0,5 mm |
| Niveau de chantier | variation d'altitude | dZ | variable | 2 cm |
| Distance-mètre électro-optique | déplacement de cibles mobiles | dD | 1 - 10 km | 7 mm ± 1-5 ppm |
| Théodolite et distance-mètre électro-optique | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | 1 - 10 km | 3 mm ± 1-5 ppm |
| dGPS (GPS différentiel) par campagnes | déplacement de points mobiles | dX, dY, dZ | variable * | ± 0,1 mm * |
| dGPS (GPS différentiel) par installations permanentes | déplacement de points mobiles | dX, dY, dZ | variable * | ± 0,5 mm* |
| Mesures distribuées (image) | | | | |
| Photogrammétrie optique terrestre | déplacement de cibles mobiles corr | dX, dY, dZ | < 200 m | 40 mm |
| Photogrammétrie optique aérienne | déplacement de cibles mobiles corr | dX, dY, dZ | Hvol < 500 m | 100 mm |
| Corrélation d'images optique terrestre | champ de déplacement 2D | dX, dY | < 500 m | |
| Corrélation d'images optique satellite | champ de déplacement 2D | dX, dY | 500 - 1000 km | ± 2000 mm** |
| Interférométrie radar INSAR satellite 1. | distance à un point cible | dD | 500 - 1000 km | 5 - 10 mm |
| Interférométrie radar INSAR terrestre 1. | distance à un point cible | dD | 1 - 3 km | 1 - 2 mm |
| Scanner laser terrestre (LiDAR TLS) 2 | comparaison de MNT | dX, dY, dZ | < 500 m | ± 20 mm |
| Scanner laser aérien (LiDAR ALS) 2 | comparaison de MNT | dX, dY, dZ | < 1000 m | ± 30 mm |

LiDAR : *Light Detection and Ranging*

MNT : Modèle numérique de terrain

INSAR : *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

ppm : *parts per million*

* : selon configuration du réseau, du site et du type de récepteur (mono ou bi-fréquence)

** : selon résolution spatiale du satellite

Tableau 2.1: Caractéristiques des principales méthodes de suivi des déplacements. (Déprez, 2010)

2. L'outils GPS

Le système GPS est un système de positionnement par satellite conçu, mis en service et maintenu par la NGA (service du Ministère de la Défense des Etats-unis). Il a été développé en vue du remplacement du système de positionnement Transit qui présentait deux limitations importantes: la première étant une couverture satellitaire insuffisante amenant une disponibilité réduite, la deuxième étant une faible précision en navigation.

Le système GPS répond aux questions «quelle est l'heure ? quelle est la position ? quelle est la vitesse ?» et ce rapidement avec précision, à peu de frais selon le type de récepteur, n'importe où et n'importe quand sur la Terre ou dans son voisinage. Les spécifications initiales sont d'avoir accès à une position absolue dans un système de référence mondiale, avec une précision de 20 mètres, et au temps avec une précision du microseconde. Il y a deux grands types de positionnement, le positionnement absolu et le positionnement relatif. Actuellement, le système permet de se positionner en absolu à quelques mètres près en temps réel et en relatif jusqu'à quelques millimètres près, à un instant donné avec précision.

Depuis les années 2000, les techniques GPS ont été largement appliquées pour surveiller les mouvements superficiels de zones instables en complément des méthodes conventionnelles. Les résultats de différents travaux portant sur la surveillance par GPS de glissements de terrain mettent en évidence l'aide précieuse de cet outil dans le cadre de mouvement plus ou moins rapide (de quelques centimètres par mois à plusieurs centimètres par jour).

Il y a plusieurs approches possibles : des positionnements discontinus qui permettent d'atteindre une précision de l'ordre de quelques centimètres ou une surveillance en continu, comme dans l'étude présente, avec laquelle la précision de la localisation peut atteindre le millimètre (Mora et *al.*, 2003).

En effet, on constate que les temps d'occupation dépendent principalement du réseau utilisé et peuvent être réduits à 10 minutes environ pour des lignes de base inférieures à quelques kilomètres avec 5 satellites visibles et l'application d'un post-traitement. Une autre alternative est la technique de réoccupation (Gili et *al.*, 2000) qui consiste à répéter les observations à une heure ou un jour différent ce qui à pour conséquence une observation sous une constellation différente. Cette procédure de mesures donne accès à une première évaluation des vitesses de déplacements sur des glissements de terrain, mais la prise de données avec ce type de méthode offre souvent un suivi limité de l'ordre d'une donnée par mois, voire par an.

La seconde approche permet de surveiller avec une haute précision les processus de glissement au cours du temps. Il y a un grand nombre d'articles présentant des études qui font suite à l'installation de stations GPS permanentes. La plupart d'entre eux font référence aux études de Malet et *al.* [2000, 2002] sur le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence) qui apparaissent comme des précurseurs dans ce domaine. Mais ce dernier reste un procédé très lourd en terme de donnée et n'est donc pas très fréquemment utilisé. Cette approche permet d'améliorer la précision du positionnement et d'affiner l'échantillonnage temporel. Des corrélations sont ainsi envisageables avec d'autres sources de données (pluviométriques, barométrie, sismologie, etc) (Baldi et *al.*, 2008).

Cette dernière approche constitue un avantage conséquent du GPS que n'ont pas les autres méthodes habituelles :

- les mesures par GPS permettent d'obtenir des solutions très précises à faible coût
- une automatisation de l'acquisition de données est réalisable
- il est possible de réaliser des mesures à toutes heures et par toutes conditions météorologiques quasiment n'importe où.

Par conséquent, le GPS peut être présenté comme une méthode alternative de choix et peut être conjuguée avec d'autres méthodes de mesures optiques afin d'obtenir un apport d'informations complémentaires dans l'étude de phénomènes naturels comme les glissements de terrain.

Les seuls points noirs du GPS sont de ne fournir qu'une information ponctuelle d'un point de vue spatial, ne fournissant que des informations à propos des mouvements de surface (il est donc essentiel de combiner des mesures GPS avec des mesures géotechniques, hydrologiques et géophysiques afin de caractériser le phénomène dans sa globalité). Ensuite, il faut éviter les obstacles (feuillage dense, bâtiments,...) pouvant restreindre la réception du signal satellite et provoquer, par réflexion, des multi-trajets de ce dernier. Puis, un nombre important de satellites visibles (7-8) et ne se situant pas trop bas sur l'horizon (élévation inférieure à 15°) est conseillé. Et pour finir, il faut généralement inclure dans le réseau plusieurs points de contrôle à l'extérieur du glissement.

Comme il le sera expliqué dans la présentation de GINS, ce logiciel peut déterminer une position à un instant donné par différentes méthodes. La première est appelée positionnement absolu (ou non-différentiel) et la seconde est appelée positionnement relatif (ou différentiel).

Lors que l'on réalise du positionnement absolu, l'utilisateur muni d'un récepteur mesure la distance entre ce dernier et plusieurs satellites à l'aide de code C/A ou P (code pseudo-aléatoire). Les éphémérides du satellite transmises par le message permettent de calculer la position du récepteur dans un repère terrestre à l'instant de l'observation. Chaque mesure de distance entre le récepteur et un satellite définit une sphère dont le satellite est le centre et sur laquelle se trouve le récepteur. Trois satellites sont donc nécessaires pour obtenir un point intersection des trois sphères. En réalité, un quatrième satellite est indispensable pour tenir compte de la non synchronisation des horloges du récepteur et des satellites. Ce type de positionnement est généralement peu précis : de quelques mètres à 100 mètres suivant le code, la qualité des éphémérides et les dégradations volontaires. L'intérêt de cette méthode est l'obtention en temps réel d'une position instantanée (utilisée pour navigation terrestre ou maritime), mais surtout la possibilité d'obtenir la position d'un point de manière totalement isolée (Duquenne et al., 2005).

En positionnement relatif, la distance est calculée soit à partir des codes P ou C/A (pseudo-distance), soit à partir des mesures de phase sur les ondes porteuses L1 et L2, simultanément avec deux récepteurs sur les mêmes satellites. Le résultat est le vecteur entre les deux récepteurs, on parle alors de calcul par double-différence des phases d'observation entre une paire de satellites GNSS et une paire de récepteurs au sol. Ce positionnement permet de diminuer l'influence des erreurs d'orbites, de propagation au sein de l'atmosphère, d'horloges satellites et récepteurs, des dégradations volontaires et est plus précis. La précision varie selon le type de mesure : métrique en pseudo-distance, millimétrique en mode géodésique statique.

La mesure de pseudo-distance nécessite la connaissance des codes pseudo-aléatoires C/A et P. Le code généré par le satellite arrive au récepteur avec un retard correspondant au temps mis par l'onde pour parcourir le chemin entre le satellite et le récepteur. Un algorithme connu génère le code pseudo-aléatoire et lie le code et le temps GPS. Le récepteur génère donc une réplique du code satellite, qui est synchronisée avec ce code satellite. La comparaison au récepteur entre le signal venant du satellite et le signal du récepteur permet de mesurer le décalage en temps Dt . La mesure se fait en retardant le code du récepteur jusqu'à ce qu'il se trouve aligné sur le code satellite (Duquenne et al., 2005).

La mesure de phase se fait par les ondes porteuses L1 et L2 de longueurs d'onde $\lambda_1 = 19,0$ cm et $\lambda_2 = 4,4$ cm. Le principe de la mesure est la comparaison de la phase du signal reçu par le récepteur avec la phase du signal généré par le récepteur (réplique du signal du satellite). On observe alors un déphasage compris entre 0 et 1 cycle (la partie fractionnaire de la différence) (Duquenne et al., 2005).

$$\Phi_i(t_R) - \Phi_j(t_E) = \Delta\Phi_j^i(t_R) + N_j^i(t_R)$$

En plus du déphasage, le récepteur détermine le nombre entier de cycles du déphasage reçu depuis la première mesure ($N_j^i(t_1)$). Ainsi, si t_1 est l'instant de la première mesure, pour toutes les autres mesures on

aura, tant que la réception n'est pas interrompue :

$$N_i^j(t_R) = n(t_R) + N_i^j(t_1) \qquad \Delta\Phi_i^j(t_R) = \Phi_i^j(t_R) - \Phi_i^j(t_E) - \{n(t_R) + N_i^j(t_1)\}$$

On voit donc que pour un satellite donné et un récepteur donné, la quantité inconnue $N_i^j(t_1)$ est la même pour toutes les mesures tant qu'il n'y a pas d'interruption du signal.

Cette quantité est appelée ambiguïté entière. Une interruption du signal provoque un saut de cycles, c'est-à-dire, une autre valeur pour l'ambiguïté entière qui se traduit par des mesures qui semblent aberrantes à partir d'une époque donnée si le saut n'est pas détecté et corrigé.

Les mesures de phases ou de pseudo-distance sont réalisées par comparaison entre le signal venant du satellite et le signal généré par le récepteur. Le bruit de la mesure est estimé de manière empirique et approché à mieux que 1% de la longueur d'onde du signal sur lequel se fait la mesure (exemple : pour une longueur d'onde de 300 m, on aura un bruit d'environ 2-3 m).

Lorsque l'on utilise un récepteur bi-fréquence, on obtient pour chaque époque la phase sur les deux fréquences Φ_1 et Φ_2 , et les pseudo-distances $R_{1,C/A}$, $R_{1,P}$, $R_{2,P}$ si le récepteur n'est pas de type «codeless» (sans code P ou C/A). On utilise aussi des combinaisons linéaires des phases, ainsi que des combinaisons linéaire de phases et de pseudo-distances (pseudo-distance lissée par la phase). La plupart des logiciels GPS présentent ces combinaisons sur les distances, c'est-à-dire $L = \lambda\Phi$.

$$\text{On a } \Phi_1 - \Phi_2 = (L_1 / \lambda_1) - (L_2 / \lambda_2) = (L_5 / \lambda_5) \quad \text{or} \quad \lambda_5 = c / (f_1 - f_2)$$

$$\text{on obtient donc : } L_5 = [1 / (f_1 - f_2)] * (f_1 L_1 - f_2 L_2)$$

Les principales combinaisons fréquemment utilisées dans les logiciels GPS sont :

- iono-free : $L_{\text{iono-free}} = [1 / (f_1 - f_2)] * [(f_1)^2 L_1 - (f_2)^2 L_2]$ // corrige de l'effet ionosphérique, elle donne une combinaison non entière des ambiguïtés.
- geometry free : $L_{\text{geometry free}} = L_1 - L_2$ // indépendante des horloges récepteur, des orbites et des coordonnées de stations.
- wide-lane : $L_{\text{wide-lane}} = [1 / (f_1 - f_2)] * (f_1 L_1 - f_2 L_2) = L_5$ // combinaison dont la longueur d'onde est la plus grande et est utilisée pour la résolution des ambiguïtés entières (Duquenne et al., 2005).

Il faut remarquer que les combinaisons augmentent le bruit de la nouvelle observable créée

Les spécificités des positionnements relatifs et absolus sont des notions importantes, de même que celles des différentes mesures réalisables ainsi que leur combinaisons, afin de comprendre la réelle utilité du logiciel qui va être testé durant cette étude.

Le positionnement de niveau centimétrique avec le GPS, et la stabilité à long terme des solutions, font appel à certaines stratégies de calcul. Tout d'abord, on peut utiliser les orbites précises des satellites, par exemple celles de l'IGS (*International GNSS Service*). De plus, on peut effectuer un positionnement différentiel qui exige la combinaison des observations de deux récepteurs GPS au minimum ; les coordonnées d'au moins une station doivent être connues. La position de l'utilisateur peut alors être estimée relativement à cette station de référence. Les observations de phase de la porteuse sont utilisées et la stratégie de calcul repose sur l'estimation de lignes de base. En général, les observations différentielles permettent d'éliminer des erreurs communes des satellites, d'horloge des récepteurs et autres erreurs. Ce mode de traitement s'est avéré

très efficace et très répandu. Mais il a l'inconvénient d'imposer l'observation simultanée aux stations de références.

Peu d'attention ont jusqu'ici été donné au traitement non différentiel des deux phases porteuses. Pourquoi ? La raison est assez simple. Les erreurs qui perturbent les observations des stations ne s'annulent pas dans le cas présent, on positionne un point de façon isolé. Par conséquent, toutes erreurs liées à l'orbite ou à l'horloge du satellite vont se répercuter sur la solution. On va avoir des erreurs liées à la géométrie, donc en fonction de l'évolution de la géométrie et de la projection des erreurs sur la position, on va avoir une signature qui va dépendre du temps. Toutefois, cette situation est susceptible de changer sachant que des positions orbitales et des données d'horloges de satellite très précises sont maintenant disponibles grâce à l'IGS.

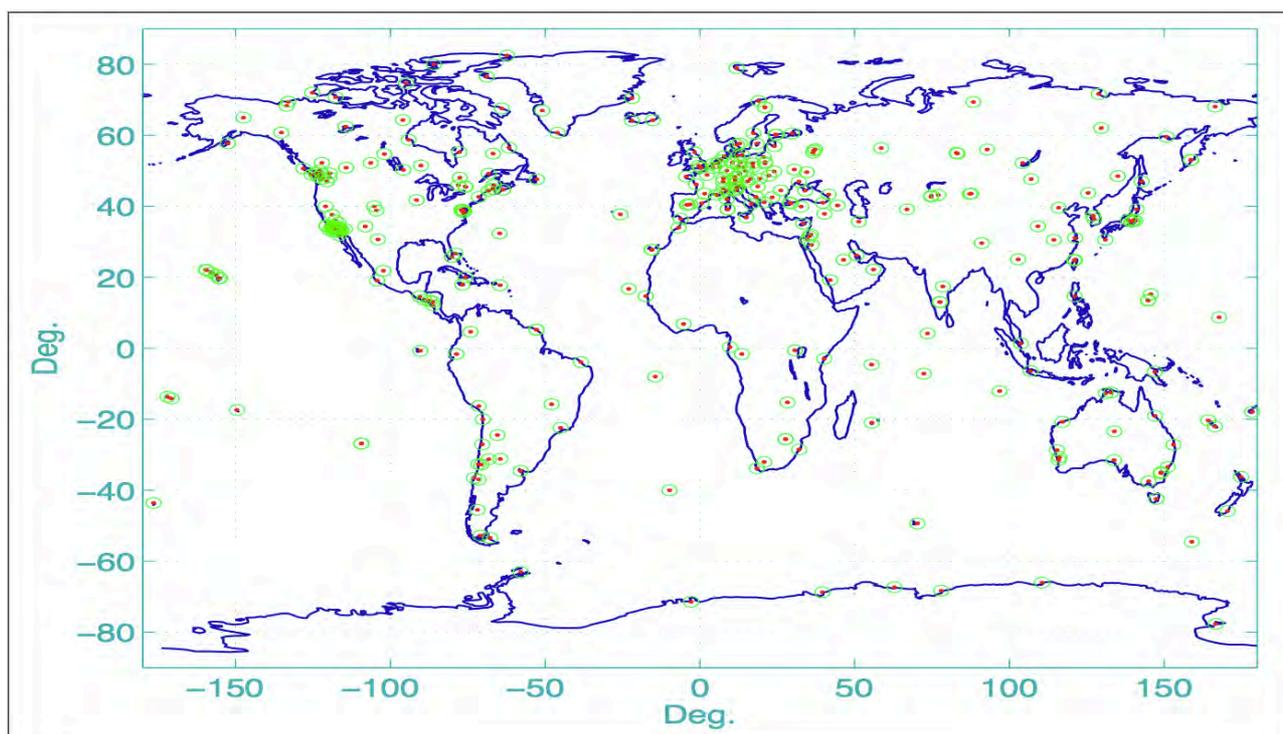


Figure 2.1 : Positions des différentes stations de l'IGS sur la planète (Perosanz et al., 2013)

Le Service International du GNSS (IGS) a été formellement reconnu en 1993 par l'Association Internationale de la Géodésie (IAG). Il fournit les éphémérides précises des satellites GPS et d'autres produits destinés aux applications géodésiques et géophysiques : paramètres d'orientation de la terre (EOP), corrections d'horloges des satellites... Ainsi, depuis janvier 1994, les orbites officielles basées sur les contributions des sept centres d'analyse de l'IGS, sont disponibles pour la communauté des utilisateurs. Le projet REPRO2 du CNES va même permettre de traiter les données d'il y a 10-15ans avec les outils et algorithmes d'aujourd'hui.

La disponibilité des données très précises d'horloges du satellite est d'une importance capitale pour la technique de traitement non différencié. La maturité des produits IGS permet aujourd'hui d'utiliser la méthode du Positionnement Ponctuel Précis (PPP) dans le cadre d'études scientifiques rigoureuses. Par définition le PPP utilise les éphémérides des satellites, réalise des observations en bi-fréquence par mesure de pseudo-distance et de phase recueillis par l'utilisateur. Le PPP implique donc un unique récepteur, le récepteur de référence utilisé en différentiel est simplement remplacé par un ensemble de récepteurs permanents dans le monde entier. La précision atteignable avec cette technique est forcément dépendante de la précision du réseau permanent sous-jacent, c'est-à-dire centimétrique. Il est possible d'obtenir une solution avec un résidu inférieur à celui d'une solution PPP par différentes combinaisons linéaires et quelques astuces mathématiques pour fixer les ambiguïtés réelles du signal satellite / récepteur.

Depuis 2006, certains chercheurs se sont rendu compte que l'on pouvait bloquer les ambiguïtés à une valeur entière en zéro-différence (FUND et al., 2012). Jusqu'à présent, le calcul par double-différence s'imposait. Il était le seul calcul qui éliminait les biais électroniques des satellites et récepteurs (et donc bloquait les ambiguïtés). Désormais il est possible de déterminer les biais satellites, il suffit alors de les décorrélés des biais récepteurs dans un premier temps, pour que dans un second, il ne reste que les ambiguïtés et les biais des récepteurs à déterminer. Il devient alors possible de décorrélés les ambiguïtés et les biais récepteurs étant donné que l'on observe plusieurs satellites à la fois. La figure 2.2 présente de manière très simplifiée les étapes du blocage des ambiguïtés entières.

A partir d'un réseau de station, le CNES par exemple (ou tout autre centre d'analyse de l'IGS) va déterminer les biais satellites WSBs (*Wide-Lane Satellite Biases*). Ce biais a une valeur par satellite et par jour, ce sont

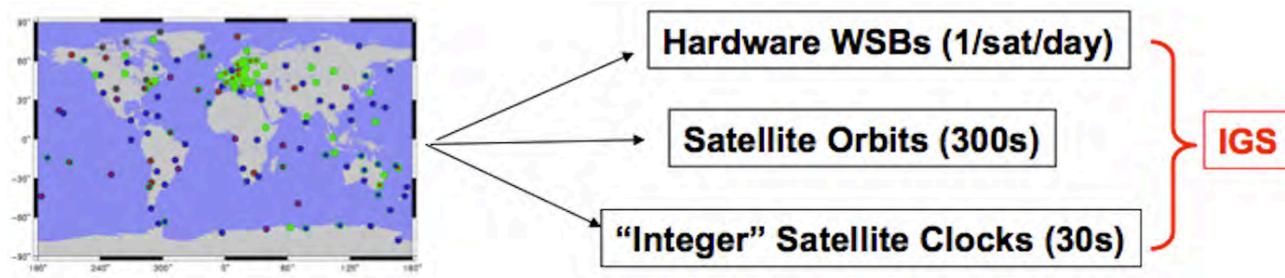


Figure 2.2 : Ensemble des données récupérées par l'IGS (Perosanz et al., 2013)

des biais très stables. Cette stabilité permet de les différencier, les rend identifiables et permet en aval de bloquer les ambiguïtés : on peut les décorrélés facilement des biais récepteurs qui eux évoluent très rapidement.

Ensuite le CNES va calculer des orbites et des horloges. Ce sont ces horloges qui ont été corrigées des biais des satellites et qui conservent les propriétés entières des ambiguïtés (*Integer-recovery clocks IRCs*). Toutes ces données vont être envoyé à l'IGS et vont être mis à la disposition des utilisateurs.

L'utilisateur est représenté par le rectangle bleu ciel sur la figure 2.3. Ce dernier va alors récupérer ces WSBs, ainsi que les orbites et les horloges, et va prendre le fichier RINEX qu'il souhaite traiter et réaliser une combinaison qui va bloquer les *Wide-Lanes*.

Une petite explication de cette combinaison WL est nécessaire : pour travailler de manière précise avec le

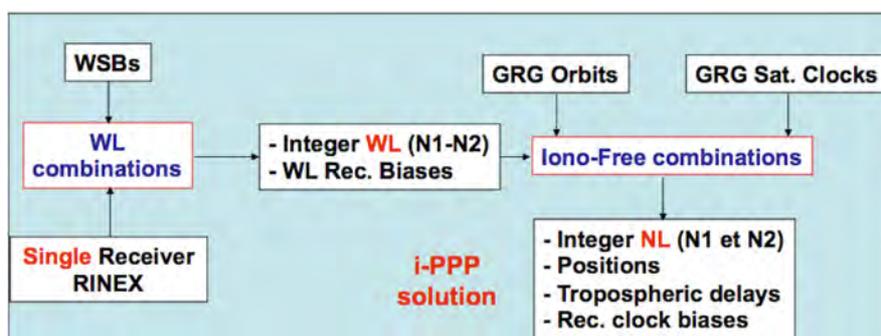


Figure 2.3 : Démarche à suivre par l'utilisateur afin de pouvoir fixer les ambiguïtés (Perosanz et al., 2013)

matériel GPS aujourd'hui, on utilise des récepteurs bi-fréquence, on a alors une ambiguïté sur L_1 (N_1) et une ambiguïté sur L_2 (N_2). Ces ambiguïtés sont difficiles à trouver car la longueur d'onde de la porteuse est d'environ 20 cm et les mesures de pseudo-distance génèrent un bruit qui est supérieur à 20 cm. Par conséquent, si on procède à une combinaison pour trouver quelle est la bonne ambiguïté, on a un bruit plus important que la longueur d'onde. Ainsi, l'objectif est de réussir à trouver soit un bruit de pseudo-distance plus petit que la longueur d'onde (cela sera peut-être réalisable dans le futur avec la mise en place de Galiléo), soit une longueur d'onde plus grande que le bruit.

Pour résoudre ce problème, il est possible de combiner les fréquences L_1 et L_2 , pour générer une mesure

«fictive» qui aura une longueur d'onde plus grande. On appelle cela une combinaison *Wide-Lane* (Grande longueur d'onde). La fréquence obtenue L_5 suite à cette combinaison a une longueur d'onde de 86 cm, plus grande que le bruit de la pseudo-distance. Les ambiguïtés sont maintenant identifiables et les bloquer devient très facile.

Cependant, ce ne sont pas les ambiguïtés présentes sur L_1 et L_2 qui sont déterminées, mais une ambiguïté unique présente sur L_5 , combinaison linéaire de L_1 et L_2 . Ceci est un bon début dans la fixation de nos ambiguïtés car dans le processus de recherche de N_1 et N_2 , si on connaît la valeur de la combinaison linéaire de N_1 et N_2 , pour un jeu de valeur de N_1 , on a un jeu de valeur de N_2 limité et non infini. Par exemple, pour une combinaison linéaire *Wide-Lane, en la simplifiant rapidement on réalise la différence des deux fréquences : L_1-L_2 . Par conséquent, l'ambiguïté associée aura comme valeur N_1-N_2 . Si on connaît N_1-N_2 , même en ne connaissant ni N_1 ni N_2 , ces deux inconnus sont intimement liées et limite grandement le nombre de solution. Reste maintenant à déterminer une ou l'autre valeur d'ambiguïté N_1 ou N_2 .*

Pour cela, dans le même temps, il faut déterminer le biais du récepteur. On forme alors cette fois une combinaison linéaire appelée *iono-free* qui est une autre combinaison de L_1 et L_2 dans laquelle on va utiliser les orbites et les horloges et où les inconnus vont être N_1 ou N_2 , les coordonnées du récepteur, le paramètre troposphérique et le décalage d'horloge du récepteur. Cette résolution se fait par une méthode statistique appelée bootstrapping qui permet de déterminer la valeur de ces inconnus. Ainsi une valeur pour N_1 ou N_2 est obtenue, ce qui conduit à la détermination de l'autre ambiguïté N_2 ou N_1 . Les ambiguïtés désormais fixées, on ne parle plus de PPP mais de *Integer Precise Point Positioning (I-PPP)*.

Le PPP ou l'I-PPP ne sont pas des méthodes de positionnement absolu. C'est un abus de langage que l'on fait par opposition au caractère relatif du calcul différentiel. Le PPP est relatif à des orbites et des horloges. Dans le cas d'une double-différence, il y a une approche "réseau", qui donne le système de référence dans lequel la solution sera exprimée, dans lequel les coordonnées de la station de référence ont été exprimées. En PPP, on obtient une solution dans un certain système de référence, les orbites et horloges que le CNES calcule sont cohérents avec ce système de référence. Par conséquent, la solution obtenue sera elle aussi cohérente avec ce système.

Lorsque l'on utilise des produits historiques GRG, les solutions seront dans le système GRG. Le CNES comme tout autre centre d'analyse de l'IGS essaye d'être le plus aligné possible avec l'ITRF2008.

Le résultat est déjà très bon mais il n'est pas idéal : 2 cm autour de l'ITRF2008 (Perosanz, et al., 2013).

Les nouveaux produits historiques GR2 issu du projet REPRO2 permettent d'être beaucoup plus optimistes : l'alignement sur l'ITRF2008 a été imposé.

Ainsi, le résultat sera cohérent avec ce système de référence.

Si on pousse le raisonnement jusqu'au bout, si la constellation de satellites au-dessus de l'Europe se trouve perturbée, la solution obtenue le sera également. Faire du traitement PPP ou faire du traitement double-différence ne sont donc pas deux notions totalement opposées.

3. Objectifs de l'étude

Le but des recherches de l'OMIV est d'obtenir un suivi cinématique continu très précis (proche du millimètre) de certaines stations placées au niveau des 5 glissements de terrain cités et ce, sans avoir besoin d'une quelconque station de référence. Le traitement par GPS est apparu comme la méthode la plus à même de s'occuper de ce genre de situation.

Jusqu'à présent, le traitement des données GPS est réalisé à l'aide du logiciel GAMIT/GLOBK (méthode par double-différence). C'est un puissant outil de calcul qui a été mis au point au MIT (Massachusetts Institute of Technology). GAMIT est une collection de programmes qui servent à traiter les mesures de phases pour estimer les positions relatives tridimensionnelles des stations terrestres. GLOBK est un filtre de Kalman dont le but principal est de combiner différentes solutions géodésiques telles que les mesures GPS, VLBI, et SLR. Cet ensemble sert au traitement des données cinématiques GNSS : un point défini en relatif par rapport à une référence fixe et connu par le biais d'une ligne de base. TRACK fournit au final les composantes du vecteur entre la référence et le mobile grâce à l'exploitation des mesures de phase entre les satellites et récepteurs. Ou bien, si le point calculé est détecté comme fixe, le logiciel ne fournira que les déplacements fictifs dans les directions Nord, Est et Altitude relatives aux imprécisions de détermination du système GNSS. La méthode de traitement GNSS correspondant à ce logiciel est le PPK (Post-Processing Kinematic). Lors de son calcul, l'utilisateur peut choisir deux types d'expériences : BASELINE ou RELAX. Avec la première option, les orbites sont fixées et les paramètres orbitaux sont omis du traitement GAMIT. Ce choix est pertinent lors du traitement grâce à des orbites IGS récentes (après 1995) ou dans le cadre de réseaux régionaux. Avec l'option RELAX, une estimation des paramètres orbitaux et ceux de rotation de la Terre est effectuée. Elle est donc plutôt adaptée à un réseau largement étendu (de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de km).

L'observable utilisé par GAMIT est dans tous les cas les données de phase. Cependant, le signal GPS étant modulé sur deux fréquences porteuses, il est possible d'exploiter chaque fréquence indépendamment. Cette approche permet de diminuer le bruit sur les mesures tant que l'erreur due au passage dans l'ionosphère est négligeable et convient pour des réseaux s'étendant sur moins de quelques kilomètres. Lorsque l'étendue du réseau atteint de plus grandes proportions, il est judicieux de recueillir les observations via une combinaison linéaire des deux fréquences. Ce procédé permet d'affranchir les données des retards ionosphériques grâce aux caractéristiques dispersives de l'ionosphère. Les ambiguïtés de phase sont ensuite fixées à des entiers par un recours aux données de code.

Avec les avancées technologiques, une nouvelle méthode d'observation GPS est née : le PPP (Positionnement Ponctuel Précis). Cette technique de positionnement GPS semble s'imposer comme la méthode la plus adaptée à cette étude. Et pour cause, grâce à elle, on détermine une position de façon isolée, sans réseau, avec un échantillonnage variant d'une position par jour à une position toutes les 30 secondes, avec une très grande précision.

Différents tests seront donc lancés afin de comprendre les spécificités de codes comme ceux de GINS, logiciel capable de traiter des données de manière totalement indépendante, et de comprendre si oui, dans quelles proportions il surpasse son homologue américain.

III. Méthodologie

1. Présentation de GINS

Le logiciel GINS (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées) est développé et maintenu par l'équipe de Géodésie Spatiale du CNES depuis plus de 40 ans pour ses activités de recherche dans le cadre du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS). C'est un logiciel d'orbitographie précise appliquée à la géodésie spatiale qui permet la restitution de nombreux paramètres géodésiques ou physiques accessibles par les observations spatiales (MARTY J.C. et al., 2012). Ces paramètres sont de trois types :

1. géométrique (tels les positions de stations et du géocentre, les paramètres de rotation de la Terre ou des planètes...),
2. dynamique (tels les coefficients harmoniques sphériques du champ de gravité ou des marées, les coefficients des forces de surface, les paramètres de la thermosphère, des caractéristiques thermo-optiques du satellite...)
3. de mesure (telles les corrections de délai troposphérique, de datation, de fréquence...).

Ce logiciel comprend d'une part un processus d'intégration numérique des équations différentielles du mouvement d'un satellite ou d'une constellation de satellites dans un repère inertiel, en prenant en compte notamment l'ensemble des forces gravitationnelles et de surface agissant sur le satellite ainsi que le mouvement d'attitude spécifié du satellite selon son macro-modèle.

Il permet d'autre part l'ajustement, par la méthode des moindres carrés, des éphémérides produites ainsi que des autres paramètres grâce aux données de suivis géodésiques de types GPS (soit une constellation GNSS, soit des mesures entre les satellites de la constellation et des satellites en orbite basse), Doppler (ex. : DORIS), Laser, optiques, altimétriques... En outre, il permet de traiter des données de types VLBI et Laser Lune.

De plus, ce logiciel peut être utilisé en analyse de mission compte tenu que la plupart des mesures décrites peuvent être simulées pour tester de nouvelles fonctionnalités ou de nouvelles missions satellitaires.

GINS est aussi un outil de géodésie planétaire qui permet de calculer la trajectoire d'un satellite artificiel autour de n'importe quel corps du système solaire : une planète, un satellite naturel, un petit corps ou le Soleil.

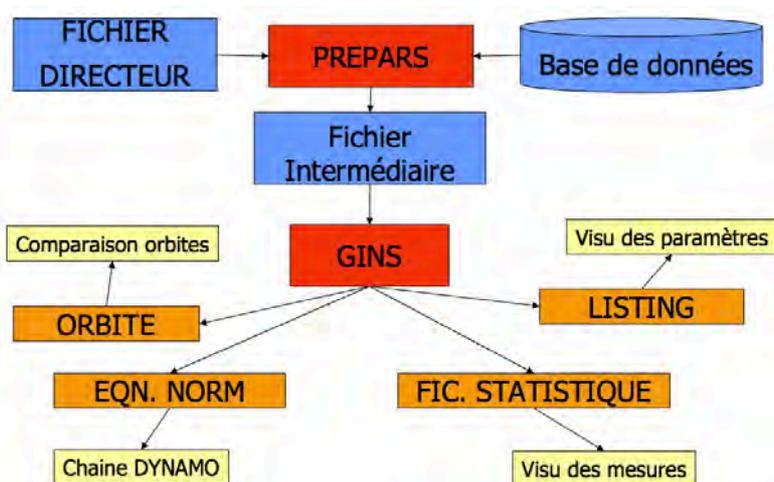


Figure 3.1 : Organigramme général du logiciel GINS présenté lors de la conférence GINS training en 2013

Sous le nom GINS est compris une série de logiciels dépendants dont PREPARS qui rassemble et prépare l'information utile au traitement, les modules DYNAMO qui sont des modules de gestion et résolution des équations normales ainsi que des logiciels annexes comme OV de comparaison d'orbites ou GINO d'exploitation graphique des résultats.

Comme le montre l'organigramme de GINS sur le figure 3.1, ce dernier a besoin d'un fichier directeur pour pouvoir traiter les données. Ces dernières doivent être au format RINEX. C'est un format d'échange indépendant du

récepteur qui a pour but de fournir dans un même format les données collectées par des récepteurs de marques différentes. Le type de fichier RINEX utilisé dans ce travail de recherche est un fichier contenant les données d'observations : dans l'en-tête on y trouve par exemple le nom de la station, le numéro de série du récepteur et de l'antenne, les coordonnées cartésiennes géocentriques approchées de la station, etc ; dans le bloc de mesure sont indiqués l'époque de l'enregistrement, le nombre de satellites enregistrés à cette époque ainsi que la liste des satellites dans l'ordre où ils sont inscrit avec un éventuel décalage d'horloge. Pour chaque enregistrement, on a la valeur de la mesure L_1 , L_2 (mesure de phase), C_1 (mesure de code C/A sur L_1), P_1 et P_2 (mesure de code P sur L_1 et L_2).

Un premier calcul est effectué : PREPARS. Ce calcul est réalisé sur le serveur Berenice du Centre National d'Etudes Spatiales de Toulouse. Cela permet au CNES de savoir qui utilise leur logiciel et à quelle fin. Cette opération consiste en une lecture du fichier RINEX et en une extraction et mise en forme des données. A la fin de ce traitement, un fichier *.fic est renvoyé à l'utilisateur. C'est alors que le traitement GINS s'opère. Ce dernier calcule chaque position occupée par la station visée toutes les 30 secondes, et fournit un fichier *.gins contenant toutes les informations du calcul ainsi que les résultats voulus, à savoir la différence de position entre la valeur *a priori* des coordonnées de la station visée et celles de la position déterminée.

Dans cette étude, il sera montré que GINS est capable de traiter les données GNSS par double-différence, mais également par zéro-différence en fixant ou non les ambiguïtés. Il peut alors parfaitement suivre un récepteur GNSS isolé par la méthode du PPP ou encore de l'I-PPP.

Plusieurs logiciels sont également capables de traiter des données par cette méthode. Prenons par exemple le logiciel GIPSY. L'étude intitulée "Applications GNSS avec GINS" réalisée par Loyer (Noveltis), Perosanz (CNES) et Melachroinos (GRGS/DTP) présente une comparaison des logiciels GINS, GAMIT et GIPSY à l'aide de la figure 3.1 :

| | GAMIT (2 solutions) | GINS/DYNAMO | GIPSY (2 solutions) | |
|--------------------------------------|---|---|---|---|
| Parameter estimation | Least Squares | Least Squares | Precise Point Positioning "Kalman Filter" with stochastic estimation (clocks, troposphere, station) | |
| Ambiguity resolution | Double difference (on 2 h) | Double difference (on 24 h) | No | |
| Session duration | 2 h | 1 h | Solution C 3 h | Solution D 24 h |
| Station estimation | Network resolution every hour | Network resolution every hour | PPP every hour | Stochastic (random walk) every hour |
| Earth Orientation Parameters | IERS standards | IERS standards | IERS standards | |
| Orbit strategy | IGS orbits (fixed) | IGS orbits (fixed) | JPL orbits (fixed) | |
| Troposphere strategy | 1 ZTD (30 min) No gradient Niell hydrostatic MF | 1 ZTD (1 h) No gradient | 1 wet zenithal (random walk 5 min) 1 gradient (random walk 15 min) Lanyi-C hydrostatic MF | |
| Solid Earth tides corrections | IERS1992 standards | IERS2003 standards | Williams and Melchior | |
| Polar tide correction | IERS1992 standards | IERS2003 standards | Yoder | |
| Atmospheric loading correctio | no | ECMWF (6 h) | no | |
| Elevation cut-off angle | 10° | 10° | 15° | |
| Reference frame strategy | Solution A | Solution B | Orbit reference frame | |
| <i>Pe</i> | 16 IGS + 3 French Permanent Stations (see fig. 2) | 11 sites IGS + French permanent stations | | |
| <i>A priori coordinates</i> | ITRF00 corrected for FES2004 predicted OTL | ITRF00 corrected for FES2004 predicted OTL | | |
| <i>Strategy</i> | loose constraint + stabilization with 10 IGS sites (glorg) | 1 mm constraint applied to IGS sites position | | |

Tableau 3.1 : Tableau comparatif des logiciels GAMIT, GINS et GIPSY (grgs.obs-mip.fr/en/content/download/310/2372/file/applications.pdf)

2. Méthodologie envisagée



Figure 3.2 : Position des stations GPS de surveillance du glissement de Villerville (VLRV, VLRB, VLRH) selon l'OMIV [2014]

Afin d'obtenir une solution très basique et très rapide d'exécution, qui permettra de constater si le résultat n'est pas aberrant, les séries temporelles de position de la station CAEN avec une solution par jour issue de mesures obtenues toutes les 30 secondes durant toute l'année 2010 seront analysées. L'échantillonnage journalier sera préféré afin d'obtenir un résultat suffisant permettant de se faire une première opinion. L'année 2010 sera l'année testée car c'est elle qui présente le plus grand nombre d'observations pour toutes les stations des 5 sites.

La majeure partie des graphiques présents dans cette étude, seront obtenus en enlevant la moyenne des coordonnées de la station calculée afin d'éliminer un *off-set* et de bien pouvoir suivre l'évolution de la solution durant toute l'année. Cela offrira un résultat plus lisible lors de déplacements faibles.

Ensuite, les mêmes traitements seront effectués avec les données des stations proches de l'agglomération de Villerville et sujettes au glissement de terrain en question. Une première indication quant à la cinématique du glissement sera alors donnée.

Une fois ce résultat acquis cette stratégie sera étendue aux différents sites observés. Le résultat sera intéressant étant donné que les autres sites présentent des glissements de terrains rapides, subissant des accélérations et décélérations au cours de l'année. Les analyses de cette étude se concentreront en particulier sur les cas de Villerville et de La Valette. Ces deux glissements présentent des caractéristiques totalement différentes et permettront de tester les capacités de GINS et du PPP dans n'importe quelle situation. En ce qui concerne le site de La Valette (figure 3.4), il y a une station RGP BACT située à 2 km de la station LVAL en aval du glissement et deux autres stations, LVA1 en zone basse au milieu du glissement et LVA2 en zone supérieure.

La prochaine étape des tests sera d'obtenir des séries temporelles de position avec une solution PPP par heure afin d'affiner l'analyse du déplacement du glissement. Ainsi, tout bouleversement lors d'une journée sera potentiellement visible et permettra de mettre en évidence une relation cause à effet qui pourra être utile dans

L'objectif premier est de traiter les données GPS en mode PPP en utilisant GINS, afin de pouvoir déterminer la méthode GNSS la plus adéquat à ce genre d'utilisation. Pour cela un calcul initial simple et rapide sera lancé, ce qui permettra directement d'analyser une première réponse. L'idée est d'utiliser les codes GINS dans une situation classique dans un premier temps afin d'avoir une simple réponse. Par conséquent, ce test sera réalisé sur une station fixe dont la stabilité est assurée et contrôlée. Ce premier coup d'oeil donnera les informations nécessaires à l'étude du traitement. Les données utilisées seront celles de la station RGP de la ville de Caen (CAEN). Comme ce test sera réalisé dans la région de Villerville (Normandie), la figure 3.2 permet de remémorer la localisation des stations GPS :

- une antenne RGP CAEN située à environ 50 km de l'agglomération de Villerville,
- VLRV qui est en zone stable en dehors du glissement,
- VLRH et VLRB qui se situent au niveau du glissement, VLRH dans la partie haute, et VLRB dans la partie basse.

Figure 3.4 : Position des stations GPS de surveillance du glissement de La Valette (LVAL, LVA1, LVA2) selon l'OMIV [2014]



l'étude des glissements. Il sera alors possible d'établir un lien entre pluviométrie, température et autres bouleversements climatiques qui pourraient modifier l'évolution du déplacement du glissement. De plus, pris sur la même période, les séries temporelles de position d'une station, par exemple CAEN, avec une solution GINS PPP par heure pourront être comparées avec celles obtenues avec une solution GINS PPP par jour. Ces tests seront effectués en premier lieu sur les stations de Villerville, en particulier CAEN qui est un gage de stabilité, puis VLRV, VLRH et VLRB. Ensuite, ces tests seront effectués avec les stations de La Valette LVAL, LVA1 et LVA2 pour voir comment se comporte les solutions de GINS lors de forts déplacements.

Une fois ce résultat obtenu et analysé, il sera intéressant de comparer ces solutions avec les données en sortie de GAMIT via un traitement différentiel. Cela permettra de voir si ces résultats sont cohérents entre eux. Il s'agira ensuite de tester GINS lors de la fixation des ambiguïtés à une valeur entière. En effet, les codes de GINS sont censés pouvoir bloquer ces ambiguïtés flottantes et offrir une solution I-PPP. L'échantillonnage horaire sera conservé afin de pouvoir comparer ces nouveaux résultats avec les séries temporelles de position des stations avec les solutions PPP horaire. La station CAEN sera toujours la première testée, puis s'en suivront les stations de surveillance du glissement de Villeville, pour pouvoir conclure sur les résultats obtenus de ces mêmes tests sur le site de La Valette.

Enfin, il est également faisable de réaliser un calcul différentiel avec GINS. Par conséquent, ce test sera réalisé sur la station VLRB avec comme station de référence VLRV. Il y aura ainsi matière à comparer les résultats obtenus via GINS en I-PPP et par double-différence. De plus, un autre test est envisageable, il est possible de soustraire manuellement deux solutions I-PPP, par exemple celles de VLRB à celles de VLRV à la manière d'un calcul double différence. Ceci pourra permettre d'éliminer des perturbations qui ne sont pas en relation avec les glissements de terrains.

Une comparaison sera alors faite entre toutes les séries temporelles de position des stations de Villerville et de La Valette obtenues par PPP avec une solution journalière et horaire, par I-PPP avec une solution horaire, par différence de solutions I-PPP horaires ou par double-différence via GINS entre elles, mais aussi avec les résultats obtenus avec GAMIT en double-différence. Tout cela sera fait dans le but de se rapprocher d'une méthode quasi-idéale de mesures et de surveillance de glissements de terrain.

Les sites de Villerville et La Valette seront les sites principalement étudiés dans ce rapport. En effet, c'est deux glissements représentent les deux cas qui s'opposent le plus en termes de caractéristiques propres (vitesse, importance, volume, etc). Cela permet de tester les traitements non-différentiels de GINS dans deux cas totalement différents. Les 3 autres sites surveillés, La Clapière, Super-Sauze et Mas d'Avignonet ne subiront que quelques uns tests effectués sur nos deux premiers sites pour des raisons de synthèse. Leurs résultats ne seront pas commentés. Ce tableau 3.2 présente un bilan des tests qui seront effectués :

| Villerville | | | | | | | | | La Valette | | | | | | | | |
|-----------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | CAEN | | VLRV | | VLRH | | VLRB | | BACT | | LVAL | | LVA1 | | LVA2 | |
| | | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h |
| PPP | | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | | | | | | | | |
| I PPP | | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | | | | | | | | |
| GAMIT | | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | 2010 | | | | | | | | |
| Temp | | 2010 | | | | | | | 2010 | | | | | | | | |
| Press | | 2010 | | | | | | | 2010 | | | | | | | | |
| Precipi | | 2010 | | | | | | | 2010 | | | | | | | | |
| Super-Sauze | | | | | | | | | La Clapière | | | | | | | | |
| | | BACT | | SAZ1 | | SAZ2 | | SAZ3 | | BACT | | CLAP | | CLP1 | | CLP2 | |
| | | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h |
| PPP | | | 2010 | 2010 | | 2010 | 2010 | | 2010 | | | | | 2010 | | 2010 | |
| I PPP | | | 2010 | 2010 | | 2010 | 2010 | | 2010 | | | | | 2010 | | 2010 | |
| GAMIT | | | 2010 | 2010 | | 2010 | 2010 | | 2010 | | | | | 2010 | | 2010 | |
| Temp | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Press | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Precipi | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mas d'Avignonet | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MDOR | | AVR1 | | AVN3 | | AVP2 | | | | | | | | | |
| | | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | 1pos/j | 1pos/h | | | | | | | | |
| PPP | | | | | | 2010 | | | 2010 | | | | | | | | |
| I PPP | | | | | | 2010 | | | 2010 | | | | | | | | |
| GAMIT | | | | | | 2010 | | | 2010 | | | | | | | | |
| Temp | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Press | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Precipi | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des tests effectués durant cette étude

IV. Sites d'étude et données d'observations

1. Le site de Villerville

Les pentes côtières sont souvent affectées par des glissements de terrain, et cela pendant plusieurs années. Le site de Villerville en est une belle illustration. En effet, deux zones sujettes à glissements se dessinent depuis quelques années déjà. Le premier est au nord de Villerville et est appelé "Fosse du Macre".

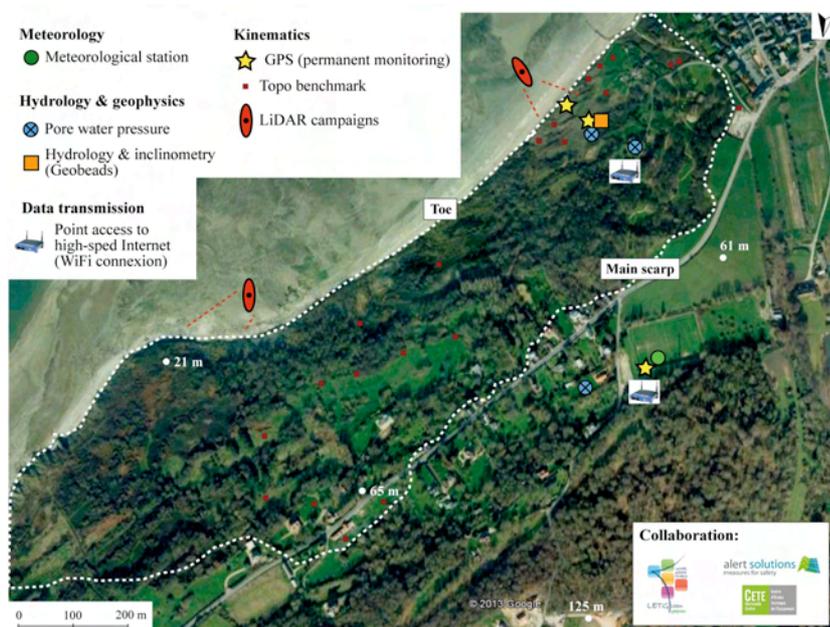


Figure 4.1 : Zone de glissement de Villerville d'après l'OMIV [2014]

Le second est un glissement de terrain au sud de l'agglomération et est connu sous le nom de "Cirque des Graves". Ce dernier est apparu dans les années 1980 et subit des légères accélérations (Lissak et al., 2009).

La surveillance de ce site est une priorité pour les autorités locales car il a déjà coûté très cher à la ville normande. Et ce dès 1987, plusieurs maisons ont été en partie ou en totalité détruites, la route départementale a été sectionnée à différents points. Après cette première alerte, trois autres ont suivi en février 1988, janvier 1995 et mars 2001.

La zone active s'est grandement étendue, continuant à endommager les constructions surplombantes (Lissak et al., 2009).

Par conséquent, différentes méthodes de mesures ont été utilisées pour contrôler l'évolution de ce glissement. Aujourd'hui, avec les avancées technologiques et leur fiabilité grandissante, il est possible de contrôler ce phénomène à distance. Les mesures GPS permettent d'obtenir un résultat précis, en continue, et de les transférer automatiquement à un centre d'analyse (comme l'EOST). Pour ce, 3 stations GPS ont été installées : la station VLRV placée en retrait dans les terres afin de ne subir aucun effet du glissement, et 2 autres ont été placées, une en haut du talus sujet au glissement (VLRH) et une autre placée en bas de ce dernier (VLRB). Jusqu'à présent, le traitement des données GPS de ce glissement est effectué par double différence à l'aide du logiciel GAMIT/GLOBK. Ce calcul est réalisé avec la station VLRV comme référence qui est une station "fixe" (la fiabilité de cette station est contrôlée en amont par la station CAEN qui est une antenne permanente à moins de 50km appartenant au réseau RGP de l'IGN).

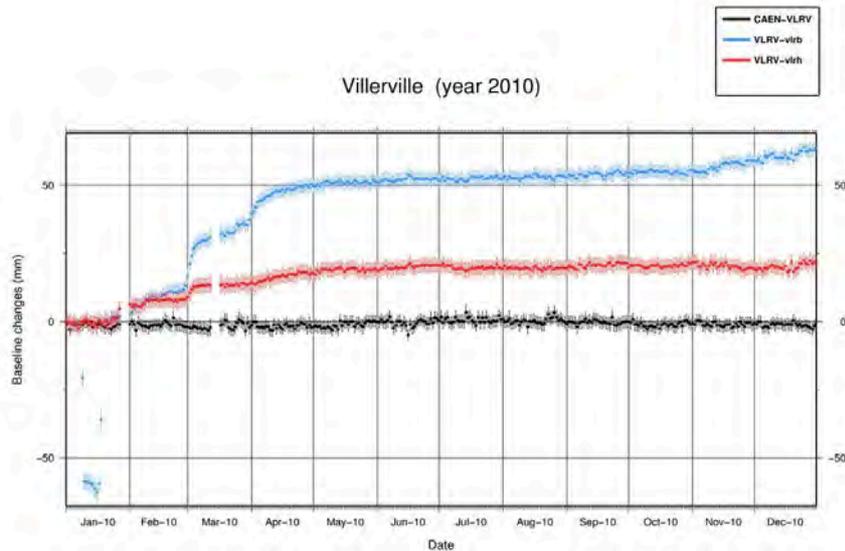


Figure 4.2 : Evolution des lignes de base entre les stations de Villerville en 2010 d'après les sources d'OMIV [2014] - (http://omiv2.unistra.fr/gps/data/vlr/baseline_1x12_2010.jpg)

L'évolution des lignes de base CAEN-VLRV, VLRV-VLRH, VLRV-VLRB est présentée par la figure 4.2. On remarque que la ligne de base entre la station permanente CAEN et la station dite "fixe" proche de Villerville est globalement constante. La ligne de base entre VLRV et VLRH augmente légèrement d'une vingtaine de millimètres et celle entre VLRV et VLRB s'allonge également de plus de 5 cm en une année. Le glissement de terrain est donc bien représenté suite aux observations GPS et au traitement double-différence réalisé par GAMIT/GLOBK. Cependant, dans ce cas précis, le déplacement du glissement n'est pas fort, la fiabilité de la solution GAMIT/GLOBK n'est pas en proie au doute. Mais quel serait ce résultat si le déplacement venait à être plus conséquent ? De plus, pour pouvoir mesurer ce déplacement, un calcul préalable des coordonnées de la station de référence, ici VLRV est nécessaire. Voilà toute la problématique de ce projet : tenter d'obtenir une solution équivalente voire meilleure de manière isolée, sans la nécessité d'un calcul en réseau.

2. Le site de la Valette

Comme il l'est expliqué par l'OMIV [2014], le glissement de la Valette est apparu en mars 1982 et est l'un des plus importants et des plus complexes mouvements de terrain du sud des Alpes françaises. Ce glissement de type coulée (Le Mignon, 2004) touche le versant en amont de la commune de Saint-Pons dans le bassin de Barcelonnette (département des Alpes-de-Haute-Provence, France) et se révèle donc être une menace importante pour près de 170 logements communautaires situés en aval. C'est un cas de réactivation d'un glissement plus ancien et se caractérise par une succession de petits glissements individuels comme il est d'habitude observé dans des glissements de terrain profonds (OMIV, 2014). Ce phénomène concerne pas loin de 4 millions de mètres cube de matériaux sur une longueur de 2 km et une largeur variable de 200 à 500 m. Entre 2005 et 2010, le taux de déplacement moyen observé est de 1 à 2 m par an vers le sud-ouest.

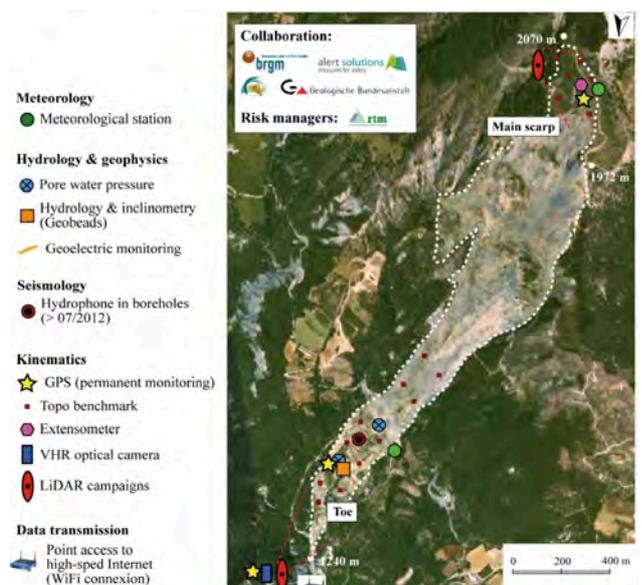


Figure 4.3 : Zone de glissement de La Valette d'après l'OMIV [2014]

Trois stations GPS ont été placées dans le cadre de sa surveillance par satellite : la première en zone stable au sud du glissement (LVAL), la seconde se trouve à hauteur du glissement en bordure (lva1) et la dernière est placée au sommet du glissement (lva2). La stabilité de la station LVAL est contrôlée en amont par la station BACT qui est une antenne permanente à moins de 2 km appartenant au réseau RGP de l'IGN.

La figure 4.4 montre l'évolution des lignes de base entre les stations de La Valette sur l'année 2010 (OMIV, 2014) :



Figure 4.4 : Evolution des lignes de base entre les stations de La Valette en 2010 selon les sources d'OMIV [2014] - (http://omiv2.unistra.fr/gps/data/lval/baseline_1x12_2010.jpg)

3. Le site de la Clapière



Figure 4.5 : Position des différents récepteurs GPS sur le glissement de la Clapière d'après El Bedoui et al., 2009

Le versant de La Clapière est localisé dans la partie Nord de la vallée de la Haute Tinée, en rive gauche. Il se situe à 80 kilomètres au Nord de Nice et à un kilomètre en aval du village de St Etienne de Tinée. D'après l'Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants, au pied du versant, un glissement de 50 millions de m³ est actif.

Ce glissement s'étend du lit de la Tinée (1100m d'altitude) jusqu'à une altitude de 1800m. Latéralement, il est limité par les vallons de Dailoutre et celui de Rabuons, soit une longueur de 1.100m et donc, une surface affectée de plus de 80 hectares. De 1952 à 1965, on a observé des déplacements de 40 cm par an. Puis cette vitesse est passée à 60 cm par an entre 1965 et 1975, et à 150 cm par an de 1975 à 1984. Enfin, dans les années quatre-vingts, le glissement a connu des pointes à 10 cm par jour.

Trois stations GPS ont été placées pour la surveillance de ce glissement par satellites : la première en zone stable dans la vallée (CLAP), la seconde se trouve au milieu du

glissement (CLP1) et la dernière est placée à hauteur du sommet du glissement en bordure de ce dernier (CLP2). La stabilité de la station CLAP est contrôlée par la station BACT de Barcelonnette vu précédemment située à environ 20 km au nord-ouest.

La figure 4.6 montre l'évolution des lignes de base entre les stations de La Clapière sur l'année 2010 (OMIV, 2014) :

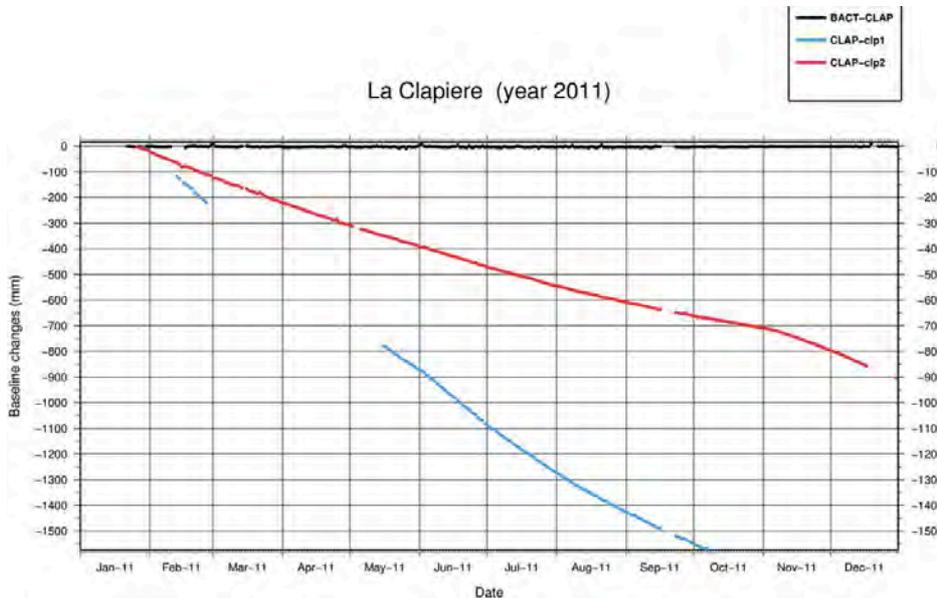


Figure 4.6 : Evolution des lignes de base entre les stations de La Clapière en 2011 selon l'OMIV [2014] - ([http://omiv2.unistra.fr/gps/data/clap/b\)aseline_1x12_2011.jpg](http://omiv2.unistra.fr/gps/data/clap/b)aseline_1x12_2011.jpg))

4. Le site de Super-Sauze

Le glissement de terrain de Super-Sauze est situé sur le versant nord du bassin de Barcelonnette. Ce mouvement est né dans la partie supérieure du torrent de la Sauze, sur le flanc gauche de la vallée de l'Ubaye. Apparu dans les années 1960, le glissement de terrain de Super-Sauze intrigue et est sujet à de nombreuses recherches.



Figure 4.7 : Positions des stations GPS permanentes de la zone de glissement de La Super-Sauze selon l'OMIV [2014]

Il est situé entre une altitude de 2105 m et 1740 m. Il a une longueur d'environ 900 m et une largeur de 150 m. Son volume total est estimé à 750000 mètres cube (OMIV, 2014). Il est représentatif de plusieurs glissement-coulées lents similaires observés dans les Alpes françaises, comme les glissement-coulées de La Valette. Sa vitesse moyenne se situe entre 2 m par an aux endroits les plus rapides, à 25 cm par an aux endroits stables.

Pour surveiller ce mouvement de terrain, 3 stations GPS ont été installées. La première se situe au pied, elle est définie sous le nom de saz1. La deuxième saz2 se situe au milieu du glissement de Super-Sauze. Pour finir la troisième et dernière station GPS se trouve dans la partie supérieure du phénomène.

La station de référence est la même que celle du site de La Valette : LVAL.

La figure 4.8 montre l'évolution des lignes de base entre les stations de Super-Sauze sur l'année 2010 (OMIV, 2014) :



Figure 4.8 : Evolution des lignes de base entre les stations de Super-Sauze en 2011 selon l'OMIV [2014] - (http://omiv2.u-strasbg.fr/gps/data/sauz/baseline_1x12_2011.jpg)

5. Le site de Mas d'Avignonet



Figure 4.9 : Positions des stations GPS permanentes de la zone de glissement de Mas d'Avignonet selon l'OMIV [2014]

Le versant d'Avignonet en rive gauche du Drac est sujet à de nombreux glissements de terrain liés à la présence, sur de fortes épaisseurs, d'argile. D'après Requillard [2004], ces glissements de terrain ont pris une allure alarmante lorsque, en 1981, d'une part des désordres apparaissent sur les infrastructures et constructions récentes du lotissement du Mas, et d'autre part un énorme glissement emportant une trentaine d'hectares de bois et de prairies se déclenche dans la combe voisine de l'Harmalière sur la commune de Sinard. En fin d'année, la Préfecture de l'Isère déclare inconstructible les 15 lots restant du lotissement, la plupart situés en aval.

En 1982, la commune d'Avignonet fait réaliser par l'ADRGT une étude sur le glissement du lotissement du Mas en vue de déterminer les principes de surveillance possible de la zone. Cette étude a mis en évidence deux types de glissements : on a des mouvements superficiels, très actifs, concernant essentiellement la couverture argileuse et un mouvement d'ensemble de la combe.

Pour la surveillance du glissement, 3 stations GPS ont été installées : AVR1 sera la station dite "fixe" en zone stable. Elle se trouve au nord du phénomène géophysique. Sachant que le glissement subit un mouvement Nord-Ouest Sud-Est, deux autres stations ont été placées de part et d'autre du glissement : une au Sud (avp2), et une autre au Nord (avn3). On peut les voir sur la figure 4.5.

La figure 4.10 montre l'évolution des lignes de base entre les stations de Mas d'Avignonet sur l'année 2010 (OMIV, 2014) :

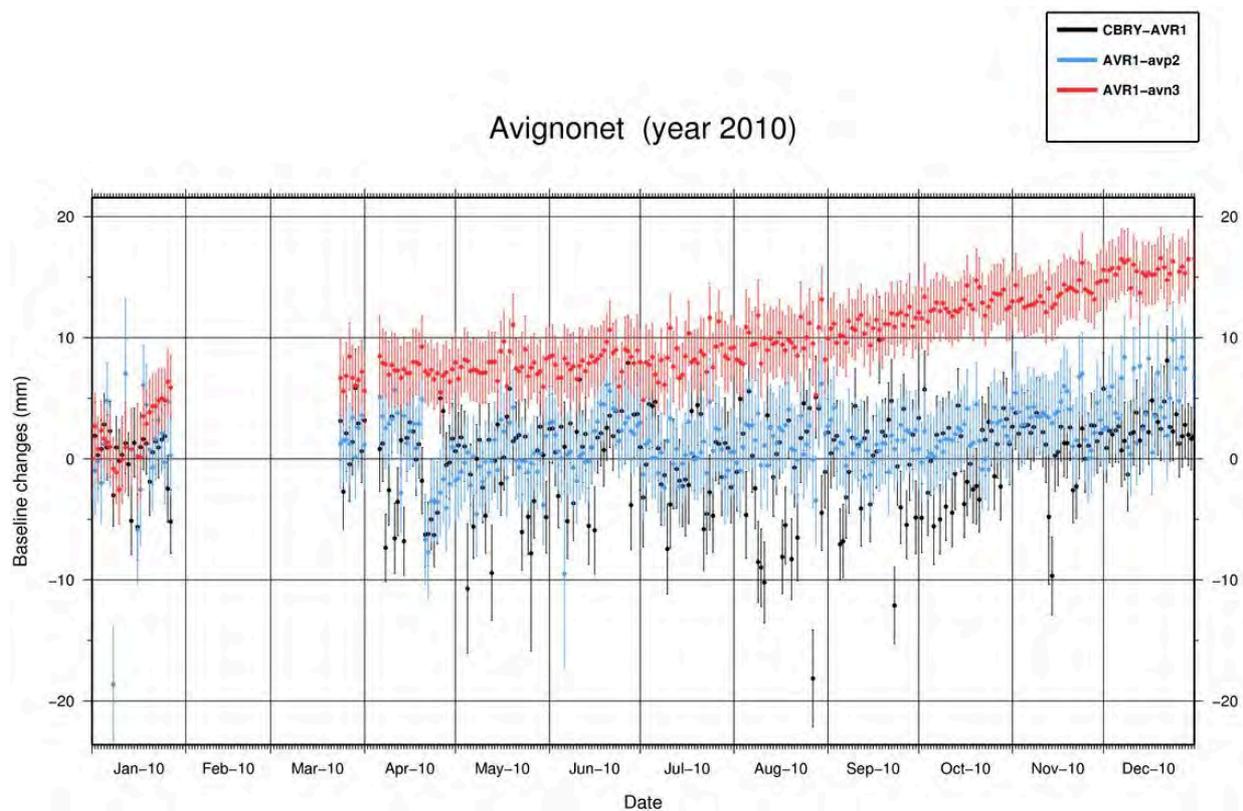


Figure 4.10 : Evolution des lignes de base entre les stations de Mas d'Avignonet en 2010 selon les sources d'OMIV [2014] - (http://omiv2.unistra.fr/gps/data/avng/baseline_1x12_2010.jpg)

V. Résultats obtenus et Analyses

Afin de découvrir les résultats et les solutions offertes par GINS, les premiers tests seront réalisés sur le site qui présente la vitesse de déplacement la plus faible. Par conséquent, le site de Villerville est désigné pour cette tâche et en particulier la station CAEN, antenne RGP de l'IGN.

1. Résultats PPP avec une solution journalière

Le premier test a été de traiter les données GPS de cette station CAEN et des stations de Villerville sur l'année 2010. Afin d'obtenir une solution très basique et très rapide d'exécution, qui permettra uniquement de constater si le résultat n'est pas aberrant, l'analyse des séries temporelles de position de la station CAEN avec une solution par jour issue de mesures obtenues toutes les 30 secondes durant toute l'année 2010 sera un premier pas dans la réalisation de cette étude. La figure 5.1 montre l'évolution de la position de la station CAEN par traitement GINS avec une solution PPP journalière.

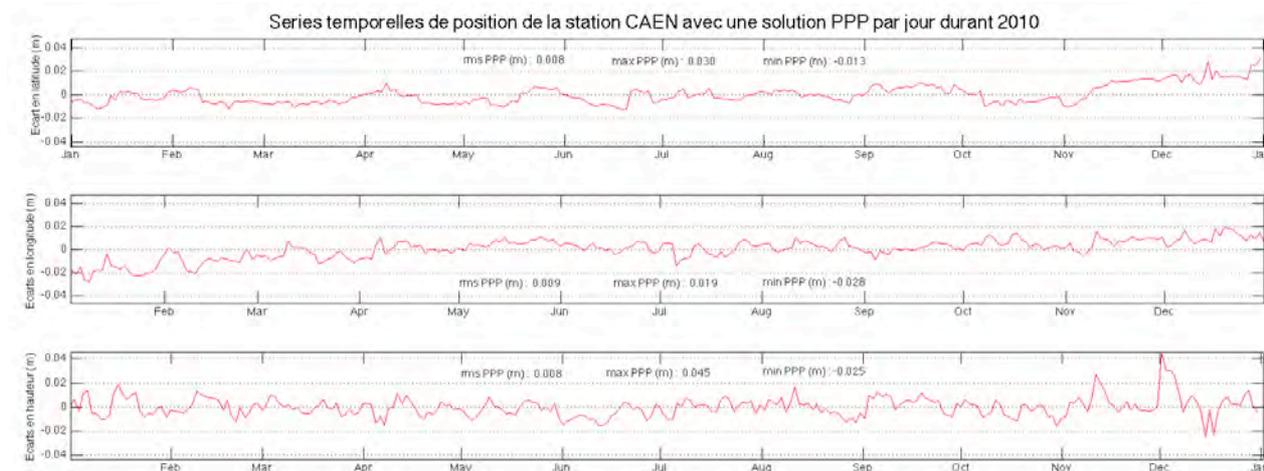


Figure 5.1: Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par jour en 2010

On remarque que les 3 séries temporelles sont cohérentes : étant donné que la station CAEN est une antenne RGP, la solution devrait en théorie donner une courbe très proche de la valeur nulle (ce qui indiquerait une parfaite stabilité de l'antenne). Cependant, une dispersion du résultat est visible et une solution dont la valeur efficace (root mean square : RMS) est centimétrique pour nos trois séries. Selon la composante Nord, la solution a des valeurs extrêmes de +3,0 cm et -1,3 cm. Selon la composante Est, les valeurs extrêmes sont +1,9cm et -2,8cm. Enfin pour la Hauteur, elles sont de +4,5 cm et -2,5 cm. On note cependant une très faible évolution centimétrique vers le Nord-Est en planimétrie au bout d'un an.

Ce premier test est encourageant. L'observation d'une station fixe a pour résultat une série temporelle de position constante sans grande perturbation. Suite à ce premier résultat, les mêmes traitements ont été effectués avec les stations proches de l'agglomération de Villerville et sujettes aux glissements de terrain.

A l'instar de la station CAEN, la solution de la station VLRV (présentée par la figure 5.2) située au sud du glissement ne subit pas les effets de ce dernier, on note une légère évolution vers le Nord-Est en planimétrie de l'ordre du centimètre sur l'année, et une stabilité relative en hauteur. Ce léger déplacement vers le Nord-Est est présent sur les deux stations distantes de 50 km. Il s'agit simplement du déplacement de la plaque

eurasienne (calculs réalisés en interne).

Le RMS reste centimétrique également pour cette station selon les trois composantes du mouvement, et les variations de position s'évaluent à 4,5 cm pic à pic en Nord, 4,7cm en Est et 5,1cm en Hauteur. On remarque également que le spectre décrit par cette courbe (figure 5.2) est très proche de celui observé à la station CAEN en planimétrie (figure 5.1).

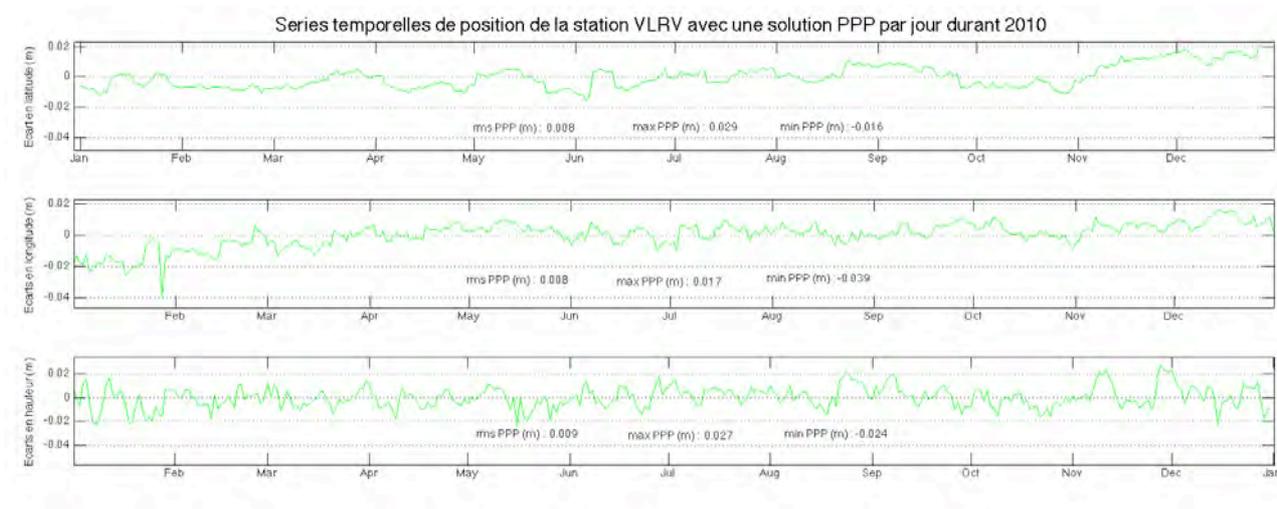


Figure 5.2 : Evolution de la position de la station VLRV avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Ce résultat confirme la cohérence des résultats PPP de GINS entre eux, non leurs exactitudes.

Ce test est maintenant réalisé avec les données des stations sensées subir un déplacement dû au glissement. En commençant par les solutions PPP journalières de la station VLRH (figure 5.3):

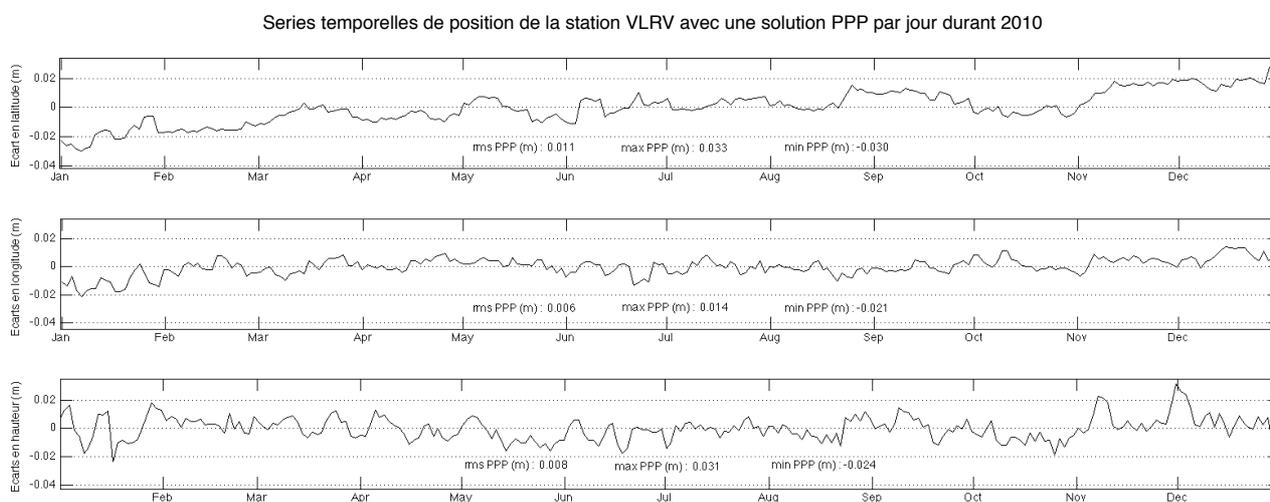


Figure 5.3 : Evolution de la position de la station VLRH avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Sur la figure 5.3, un déplacement vers le Nord-Est de 5,4 cm, un autre vers l'Est de 1,8 cm a été constaté ainsi qu'une stabilité relative en Hauteur.

Après analyse, les stations de CAEN et VLRV subissent le déplacement de la plaque eurasienne vers le Nord-Est. Etant donné que les stations CAEN, VLRV et VLRH sont proches (VLRV et VLRH sont distantes d'environ 500m), la même perturbation devrait être ressentie au niveau de la station de VLRH. Or le déplacement observé sur la figure 5.3 s'élève à 5,6 cm en planimétrie.

Un autre déplacement s'est conjugué avec le mouvement déjà observé. Il résulte du phénomène recherché, il est le fruit d'un glissement de terrain.

La figure 5.4 montre le déplacement vers le Nord-Ouest de la station VLRB :

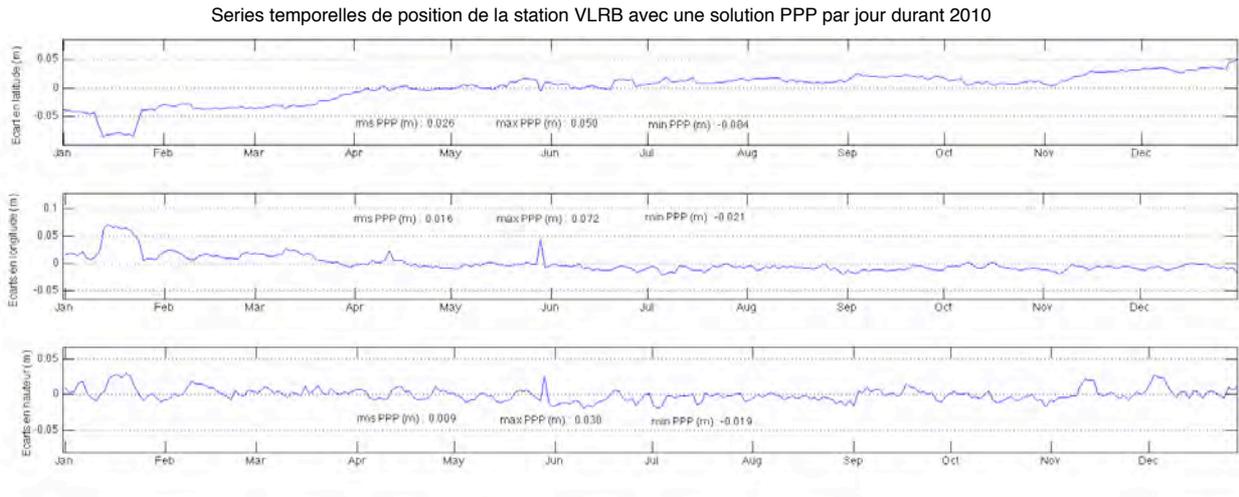


Figure 5.4: Evolution de la position de la station VLRB avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Sur la figure 5.4, une accélération durant les mois de mars avril et une stagnation du déplacement les mois suivants sont remarquables ainsi reprise de l'accélération vers les mois de novembre et décembre. La première accélération pourrait être expliquée par le réchauffement et l'adoucissement du climat à cette période (dégel), il en est de même pour la stagnation en milieu d'année qui est le fruit d'un climat assez stable. Comme expliqué en première partie, les glissements de terrain sont très sensibles aux changements climatiques car le premier élément déclencheur du glissement, à savoir l'eau y est très sensible.

Il est à noter que le fort déplacement remarquable mi-janvier n'est pas le fruit d'un phénomène géophysique mais d'une perturbation technique et physique de l'antenne qui a été rétabli à la fin du mois.

Un déplacement de la station de VLRB s'élevant à 9,9 cm vers le Nord-Ouest est enregistré.

Par ailleurs, une comparaison des résultats va être faite avec ceux du logiciel GAMIT obtenus par traitement double-différence qui ont été longuement calculés et contrôlés par l'OMIV.

Le calcul de la ligne de base entre VLRV et VLRB, solutions obtenues toutes deux par la méthode du PPP traitées avec GINS pourra permettre de comparer cette dernière avec celle obtenue avec GAMIT (figure 5.5). *A priori*, le mouvement de glissement est bien enregistré et ce déplacement Nord-Ouest est bien retranscrit sur la figure 5.5. On y trouve aussi les changements de vitesse au mois d'avril, de novembre et de décembre.

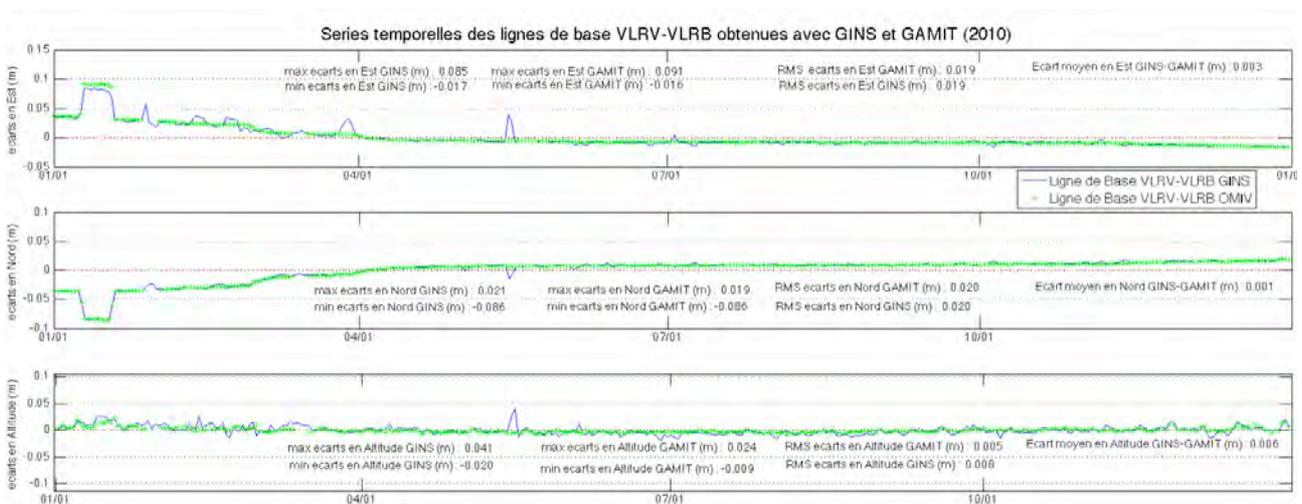


Figure 5.5 : Comparaison entre la ligne de base VLRV-VLRB avec une solution PPP journalière via GINS et celle calculée avec GAMIT par calcul différentiel en 2010

La première analyse à faire se porte sur la composante Est. La valeur efficace des écarts selon GINS et GAMIT est identique : 1,9 cm.

Malgré quelques perturbations et écarts de 5 à 6 mm au début de l'année, les deux séries temporelles diffèrent en moyenne de 3,4 mm.

En ce qui concerne la composante Nord, on obtient avec GINS en PPP une solution dont le RMS, de 20 mm, est équivalent à celle obtenue avec GAMIT. Les deux séries temporelles diffèrent en moyenne de 2,2 mm.

Pour finir, l'étude de l'évolution de la Hauteur des deux solutions présente une divergence au niveau de la valeur efficace : celle obtenue avec GINS a pour valeur 8 mm alors que celle en sortie de son homologue GAMIT a pour valeur 5 mm.

Ces deux séries temporelles sont séparées par en moyenne 6,4 mm.

La figure 5.6 est issu du graphique 5.5 avec un changement d'échelle afin d'appuyer plus lisiblement ces chiffres.

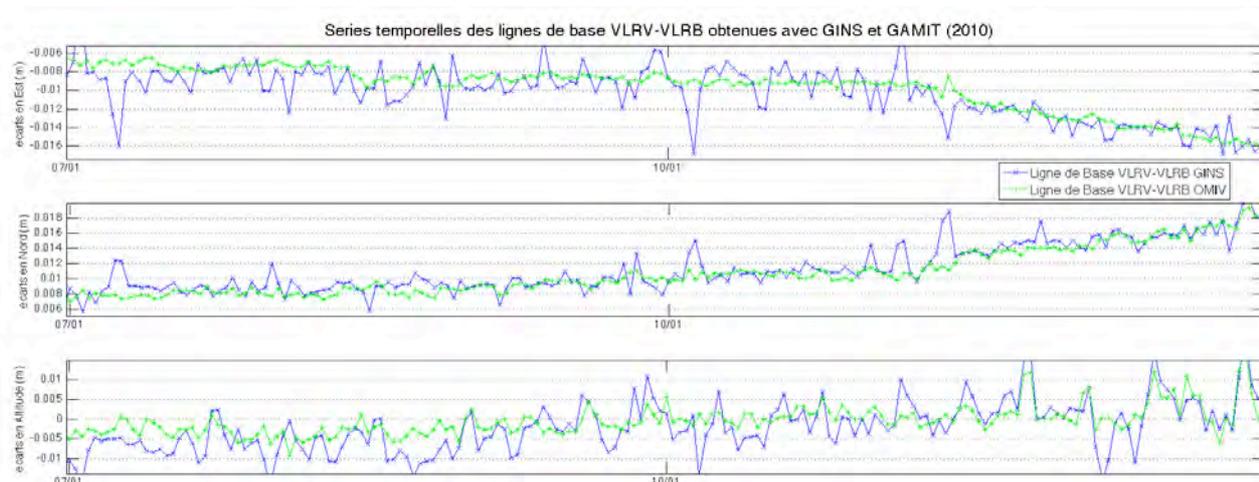


Figure 5.6 : Comparaison entre la ligne de base VLRV-VLRB avec une solution PPP journalière via GINS et celle calculée avec GAMIT par calcul différentiel durant le second semestre de 2010

La solution PPP fournie par GINS est très proche de la solution fournie par GAMIT/GLOBK. Mais ce test a été réalisé sur un site dont le déplacement n'était pas excessivement important. Par conséquent, ce même test va être réalisé sur le site de La Valette.

Afin de vérifier si la solution PPP journalière en sortie de GINS est recevable également lorsque le déplacement est un peu plus important, le même test que précédemment va être lancé sur une des stations GPS chargées de la surveillance du glissement de terrain de La Valette.

La station la plus encline à subir ce phénomène physique est certainement la station en amont du glissement : LVA2. C'est alors les séries temporelles de cette station qui serviront pour ce test. A l'instar de la station RGP CAEN pour le site de Villerville, BACT est l'antenne RGP de Barcelonnette et se situe à 2 km de la station LVAL.

La figure 5.7 présente les séries temporelles de position sur l'année 2010 de la station LVA2 avec une solution PPP par jour et la compare à la solution obtenue via GAMIT.

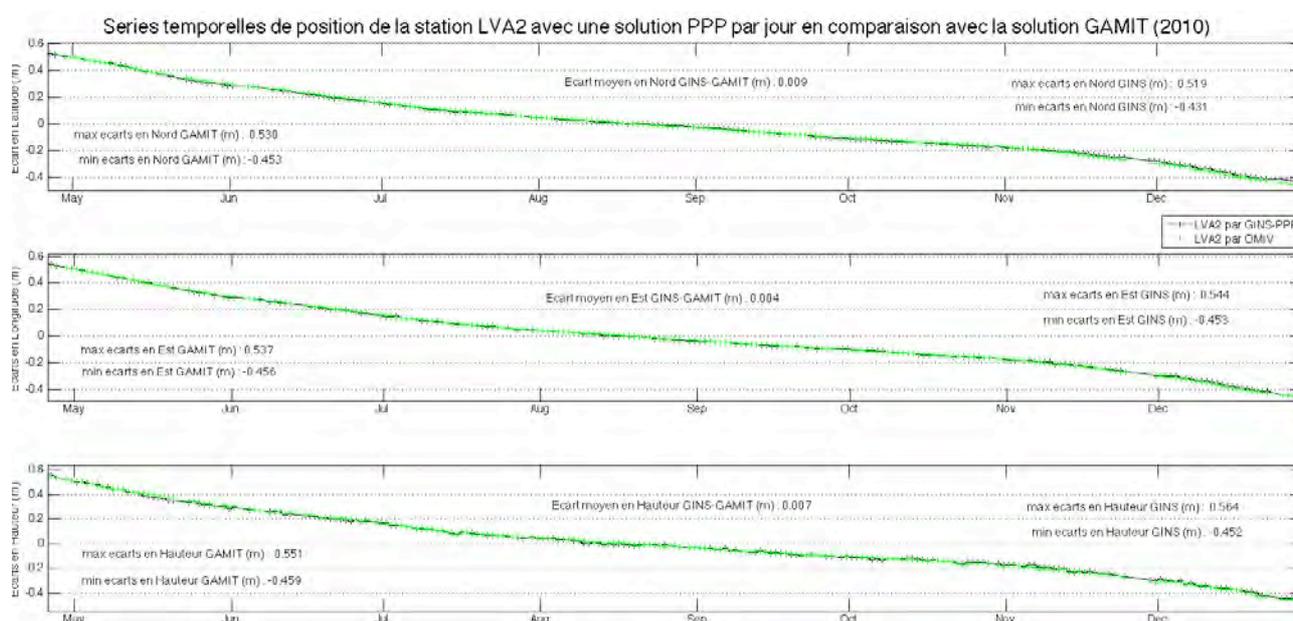


Figure 5.7 : Evolution des coordonnées de la station LVA2 avec une solution GINS PPP par jour comparées aux résultats donnés par GAMIT en 2010

Cette séries temporelles débutent fin avril tout simplement parce qu'il n'y avait pas de données avant cela. En premier lieu, un mouvement de la station LVA2 a été enregistré. Caractérisé par une accélération pendant les périodes hivernales de l'année 2010 et une stagnation de la vitesse du glissement durant la période chaude, cette station s'est déplacé de 98,3 cm vers le Sud, de 103,5 cm vers l'Ouest et a subi une baisse de 101 cm au niveau de la Hauteur. En d'autre termes, le glissement a bougé de 145 cm vers le Sud-Ouest. Ce résultat est cohérent avec les faits du glissement de La Valette rappelés en première partie.

Toujours sur la figure 5.7, les deux solutions GAMIT et GINS suivent le même déplacement. En effet les deux courbes ont la même allure. En observant les séries temporelles de position selon les trois composantes, on remarque que les deux courbes sont séparées par 9 mm en moyenne en Nord, 4 mm en Est et 7 mm en Hauteur. La solution GINS-PPP pour LVA2 sur l'année 2010 est très proche de la solution GAMIT.

Avec ces premiers résultats, il est possible de poursuivre ce travail et de chercher à obtenir une solution PPP plus transparente. Le résultat obtenu par traitement PPP via GINS avec une solution par jour s'est révélé très concluant. Cependant, lorsque l'on travaille sur la surveillance de glissement de terrain, il peut être utile d'obtenir une solution par heure, afin de suivre l'évolution d'un glissement de manière plus pointue au cas où un facteur journalier interviendrait. Le cas du séisme au Nord de la ville de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence) qui est survenu le 7 avril 2014 en est un bon exemple.

D'autres tests vont être lancés afin de pousser le traitement PPP via GINS au maximum de ses capacités dans ce domaine. Cela va commencer par l'obtention d'une solution non plus journalière, mais horaire.

2. Résultats PPP avec une solution horaire

Comme décrit en première partie de cette étude, la précision obtenue en sortie du traitement PPP avec GINS dépend avant tout de la précision des données qui sont en entrée (orbites, horloges...). Les résultats des premiers tests ont été obtenus à partir de produits historiques et d'orbites GRG. Ces produits sont assez précis pour obtenir une solution exploitable lorsque l'on a besoin d'un échantillonnage de l'ordre d'une solution par jour. Par contre, lorsque l'on veut un échantillonnage plus petit, ces produits deviennent rapidement handicapants pour obtenir un bon résultat (la précision d'orbites des produits GRG est de l'ordre de 2 cm). Depuis la réalisation du projet REPRO2, les produits ont été retravaillés et retraités afin d'obtenir une précision d'horloge et d'orbite bien meilleure et avec la contrainte de coller à l'ITRF2008. Ce projet étant un travail rétro-actif, il est possible aujourd'hui d'obtenir des produits historiques d'il y a plusieurs années avec une meilleure précision. Comme il est stipulé dans l'étude "Contribution des Centres d'Analyses CNES / CLS IDS et IGS à l'ITRF2013" (Capdeville et al., 2014), les produits GNSS 'GR2' issus du traitement REPRO2 sont disponibles aux formats GINS. Les résultats obtenus en PPP seront sans translations/rotations notables par rapport à l'ITRF2008. Il restera un effet d'échelle dominé par un signal de quelques millimètres à la

période annuelle qui peut être corrigé *a posteriori* sur les séries obtenues.

La figure 5.8 fait la comparaison entre deux séries temporelles de la même station au mêmes instants avec une solution PPP horaire basée sur les produits GRG et des produits GR2 :

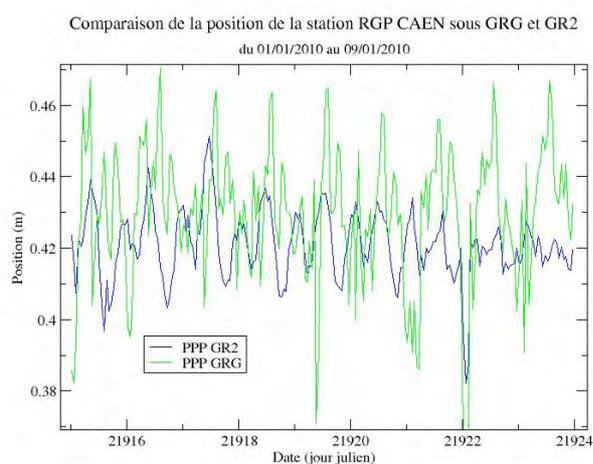


Figure 5.8 : Comparaison des séries temporelles de position de la station CAEN par traitement PPP avec des produits historiques GRG et GR2 sur une dizaine de jours

Il est clair que la diffusion des solutions est bien meilleure avec des produits historiques et orbitaux GR2 plutôt que GRG. Par conséquent, pour la suite des tests restants, les produits GR2 seront préférés aux produits GRG afin d'obtenir une précision optimale sur les données en entrée.

A la manière des premiers tests réalisés avec un échantillonnage d'une solution PPP par jour, les premiers tests par échantillonnage horaire vont être réalisés avec les données des stations placées sur le site sujet aux glissements les moins rapides et que bien connus de cette étude afin d'avoir un premier aperçu du résultat.

La station RGP de Caen est la première à être testée. Les séries temporelles sur l'année 2010 obtenues par solution GINS-PPP horaire sont présentées par la figure 5.9 :

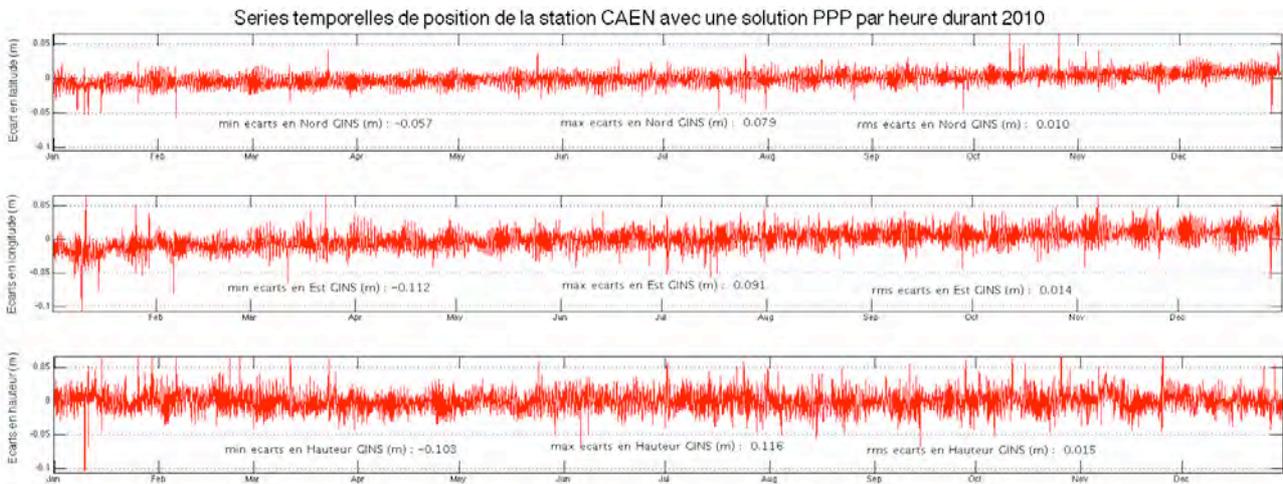


Figure 5.9 : Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par heure en 2010

Le premier constat est que les séries temporelles de position de la station CAEN avec une solution PPP horaire sont beaucoup plus diffuses. Ce constat est normal, la solution obtenue est une valeur moyennée. Les mesures disponibles sous format RINEX ont un échantillonnage de 30s. Lorsqu'une solution horaire est désirée, GINS récupère toutes les mesures effectuées, par exemple entre 8h00 et 8h59, autrement dit 119 mesures et donne en sortie une seule et unique valeur représentative des résultats sur ce laps de temps. Par conséquent, plus le nombre de valeurs moyennées augmente, moins la courbe va garder son aspect lisse mais elle donnera plus d'informations et deviendra plus transparente.

Le RMS calculé pour ces solutions est de 1cm, 1,4cm et 1,5cm selon les composantes Nord, Est et Hauteur. Ces données sont légèrement supérieures à celles obtenues sur la même station lors du premier test étant donné la dispersion des solutions horaires. Une comparaison entre les séries temporelles de position de la station CAEN avec une solution GINS-PPP horaire et celles avec une solution GINS-PPP journalière est proposée par la figure 5.10 :

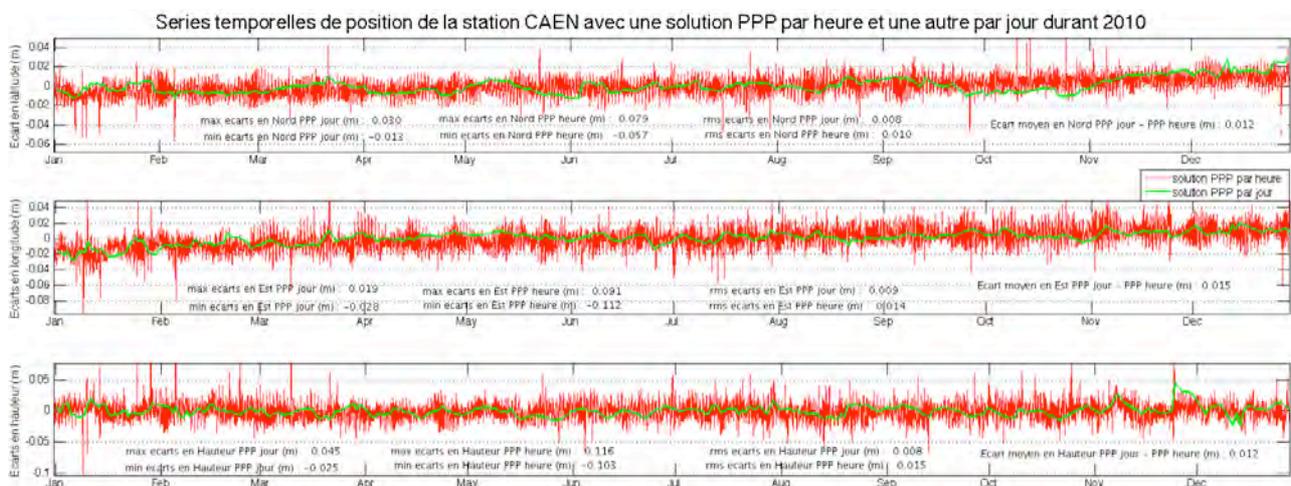


Figure 5.10 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et journalière en 2010

La solution obtenue est nécessairement plus bruitée que la solution journalière. Les extremum sont beaucoup plus faibles au niveau de la solution journalière. Le RMS s'en voit tout naturellement plus bas pour cette dernière solution que pour la solution horaire. Malgré tout, ce positionnement par traitement PPP avec une solution toutes les heures fournit les mêmes informations que la solution journalière : le déplacement centimétrique vers le Nord-Est dû à la tectonique des plaques est retranscrit correctement, ainsi que la stabilité de la station RGP.

La solution PPP horaire obtenue avec GINS est représentée par la figure 5.11 lorsque le laps de temps étudié est restreint à 3 mois :

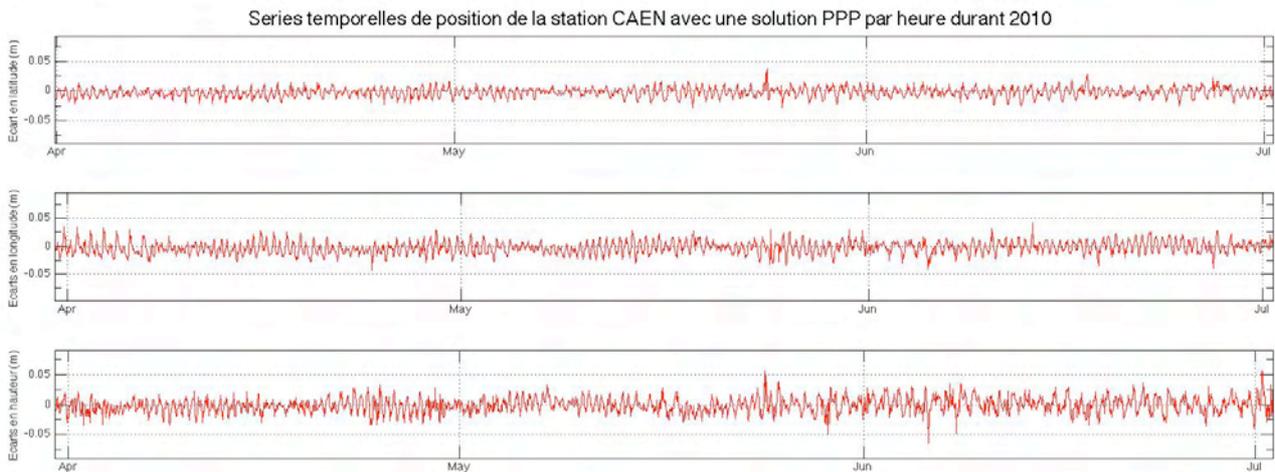


Figure 5.11 : Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par heure durant 3

La figure 5.11 montre l'évolution de la position de CAEN avec une solution PPP journalière durant les mois d'avril, mai, et juin. Au delà du glissement de terrain, un signal apparaît. Des oscillations d'une amplitude variable pouvant aller jusqu'à 5 cm sont visibles.

La possibilité que ces oscillations soient les artéfacts inévitables des solutions PPP décrites lors de la présentation de cette méthode de traitement dans la première partie est réelle, mais ces derniers sont sensés varier entre 1 et 2 cm. L'hypothèse que ce signal soit le fruit du traitement PPP en raison des ambiguïtés réelles apparaît comme la plus probable. L'analyse de ces oscillations sera faite plus profondément plus tard dans cette étude.

La figure 5.12 présente le résultat du même traitement sur la station la plus mobile du glissement de Villerville VLRB :

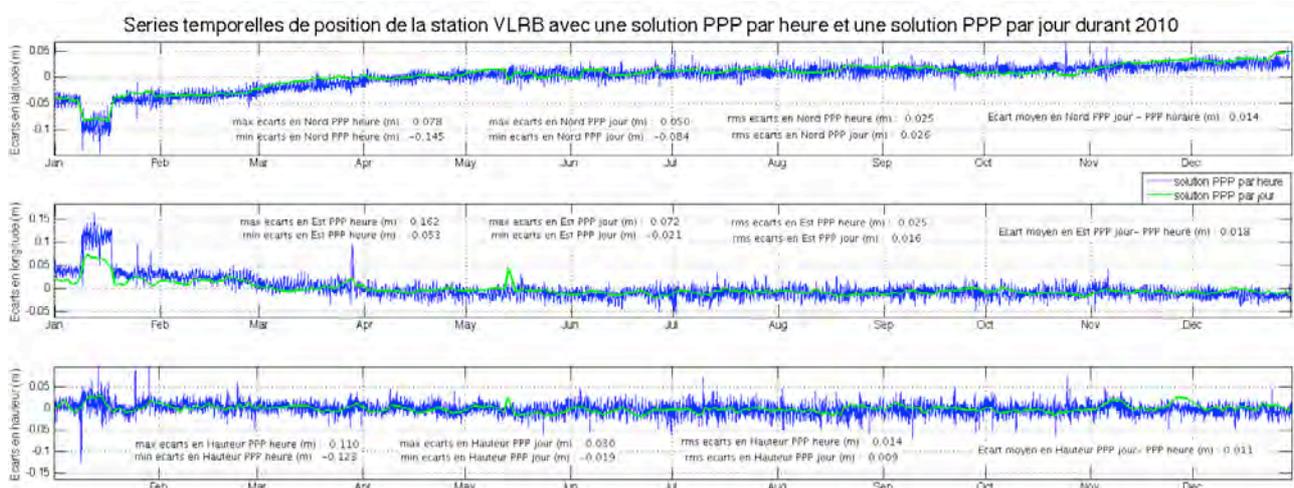


Figure 5.12 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS PPP par jour durant 2010

Le déplacement observé précédemment pour cette même station se retrouve également dans ce résultat (figure 5.12). Le mouvement subit par la station LVA2 a bien été enregistré, et ce dans les mêmes proportions que le résultat à une solution PPP par jour (les RMS sont distants de 1 mm selon la composante Nord, 9 mm selon la composante Est, et 5 mm en Hauteur). Le même constat peut être fait pour la station CAEN lorsque sa position a été déterminée par traitement PPP via GINS avec une solution par heure : le déplacement de la station (indirectement, du glissement) est visible et cohérent avec les tests précédents, mais des oscillations, *a priori* de même nature apparaissent et brulent la solution.

Toujours dans la même stratégie d'analyse, les données de la station LVA2 de la Valette vont être traitées également avec une solution PPP horaire durant 2010. Cela donnera quelques informations supplémentaires sur le comportement de GINS lorsque ce dernier doit effectuer le même traitement pour les données d'une station animée d'un mouvement plus conséquent. Le figure 5.13 présente le résultat obtenu :

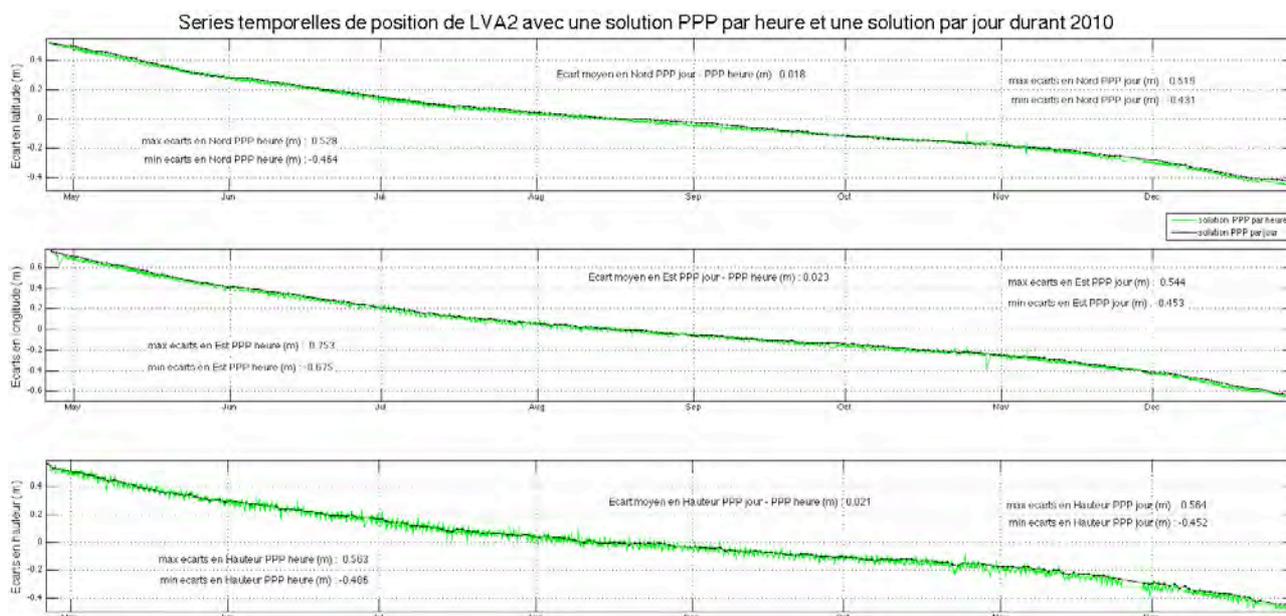


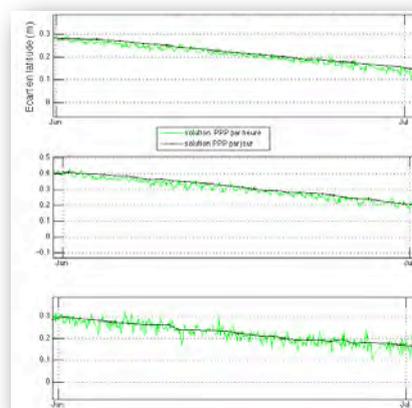
Figure 5.13 : Comparaison entre l'évolution de position de la station LVA2 avec une solution PPP horaire et une solution PPP par jour durant 2010

L'allure des séries temporelles de position de la station LVA2 avec une solution PPP par heure est quasiment identique à celles avec une solution PPP par jour. Le déplacement de cette station est bien visible ainsi que les accélérations du glissement fin avril jusqu'à début mai et durant les mois de novembre et décembre. Les écarts moyens entre les deux solutions sont d'environ 2 cm.

De plus, de nombreuses oscillations apparaissent lorsque la figure 5.13 est légèrement agrandie (voir figure 5.14), des oscillations identiques à celles présentes sur les graphiques présentant les autres solutions PPP horaires. Ces oscillations s'élèvent dans le cas présent jusqu'à une dizaine de centimètres en Hauteur et quelques centimètres en planimétrie.

Pour résumer notre étude jusqu'à présent, la solution PPP journalière traitée par GINS permet de suivre le déplacement du glissement jour après jour. Mais dès que l'échantillonnage devient horaire dans le but de suivre au plus près les glissements, une perturbation apparaît sur nos séries temporelles et augmente sensiblement la dispersion. L'hypothèse que ces oscillations soient le fruit de la non-fixation des ambiguïtés à une valeur entière a été émise. Mais il est également possible que cette solution PPP horaire révèle l'existence d'un phénomène, peut-être géophysique. La possibilité de traiter les données GPS en fixant des ambiguïtés à des valeurs entières est le test approprié pour poursuivre notre étude et peut aider à la compréhension de ces oscillations.

Figure 5.14 : Agrandissement de la figure 5.13 au niveau du mois de juin 2010



3. Résultats I-PPP avec une solution horaire

Toujours dans le même esprit de recherche et d'analyse, l'obtention des séries temporelles de position d'une station RGP avec une solution I-PPP horaire durant la même année 2010 va être réalisée afin de pouvoir comparer les différents résultats. Voici en premier test la solution I-PPP horaire comparée à la solution PPP horaire au niveau de la station RGP de CAEN (figure 5.15) :

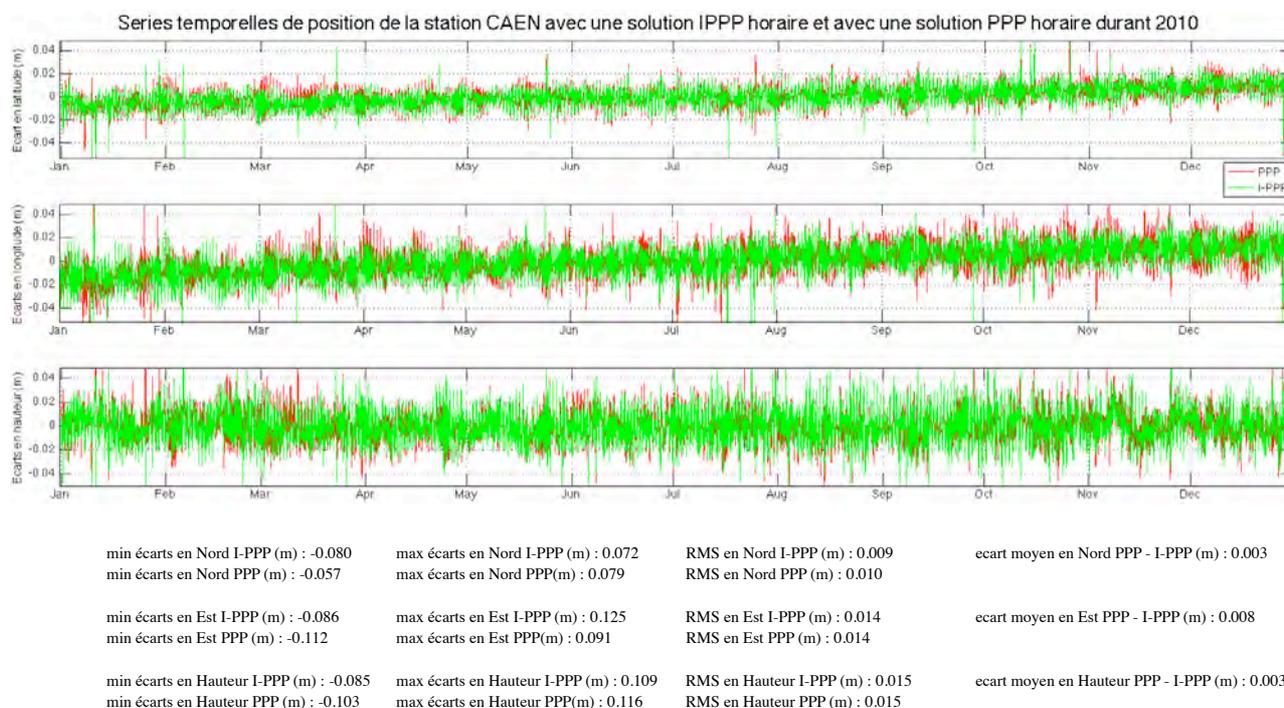


Figure 5.15 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant 2010

La figure 5.15 montre que ce résultat de position de station fixe RGP est correct et n'enregistre aucun déplacement local. Le RMS de la solution I-PPP est à peine plus faible que celui de la solution PPP selon les 3 composantes.

Les écarts entre ces deux solutions sont très faibles : 3 mm en altimétrie, 3 mm en Nord et 8 mm en Est.

Etant donné que la solution est légèrement faussée par la tectonique des plaques, l'analyse de cette figure 5.15 a été réalisée en enlevant la courbe de tendance vers le Nord-Est afin d'obtenir le résultat brut et pouvoir juger la valeur vraie du RMS. Avec cette méthode, le traitement I-PPP se montre bien plus performant que le traitement PPP :

RMS en Nord I-PPP (mm) : 7,6
RMS en Nord I-PPP (mm) : 8,4

RMS en Est I-PPP (mm) : 11,1
RMS en Est I-PPP (mm) : 12,3

RMS en Hauteur I-PPP (mm) : 14,75
RMS en Hauteur I-PPP (mm) : 14,77

La fixation des ambiguïtés entières a contribué à la diminution de la dispersion des solutions sans aucune perte d'information.

Afin de mieux observer les oscillations présentes sur la figure 5.15, celle-ci a été agrandie de manière à pouvoir observer ces perturbations sous un meilleur angle et est présentée par la figure 5.16 :

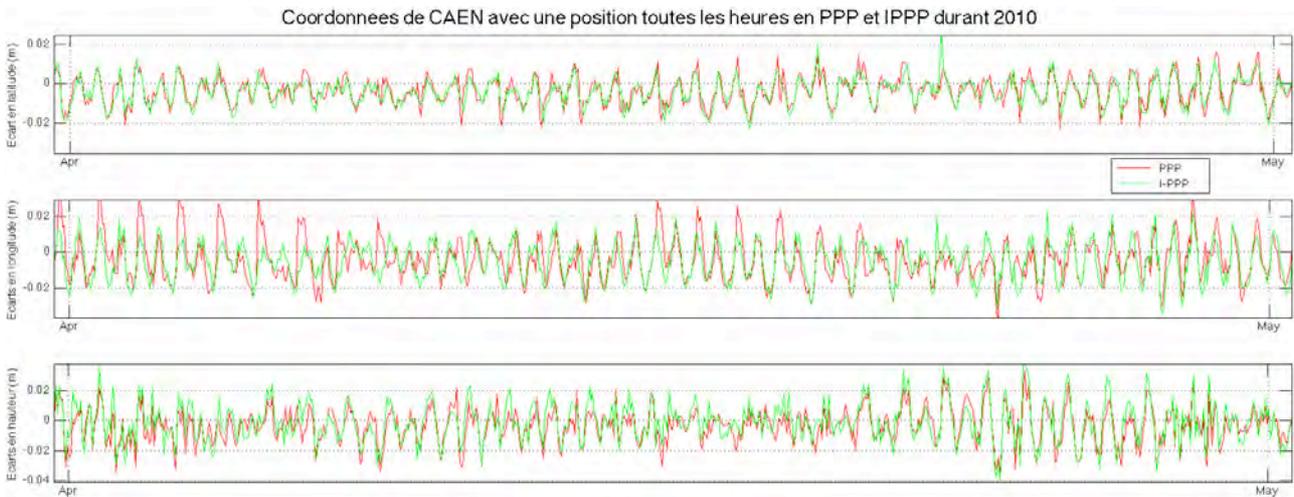


Figure 5.16 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant Avril 2010

Ce premier résultat en sortie de traitement I-PPP donne quelques informations sur ces oscillations. Le passage au traitement avec fixation des ambiguïtés entières a réduit l'amplitude des oscillations, mais pas de manière significative. Ces oscillations de plusieurs centimètres ne sont pas le fruit de la non fixation des ambiguïtés flottantes. Ce spectre ne peut donc que, soit provenir du traitement GINS en lui-même, soit résulter d'un phénomène extérieure.

En restant dans cette logique de mise en situation du traitement non-différentiel, le même traitement a été effectué avec les données de la station VLRB et est représenté sur la figure 5.17 :

Séries temporelles de position durant 2010 de la station VLRB avec une solution PPP horaire, une solution I-PPP horaire, et une solution obtenue avec GAMIT

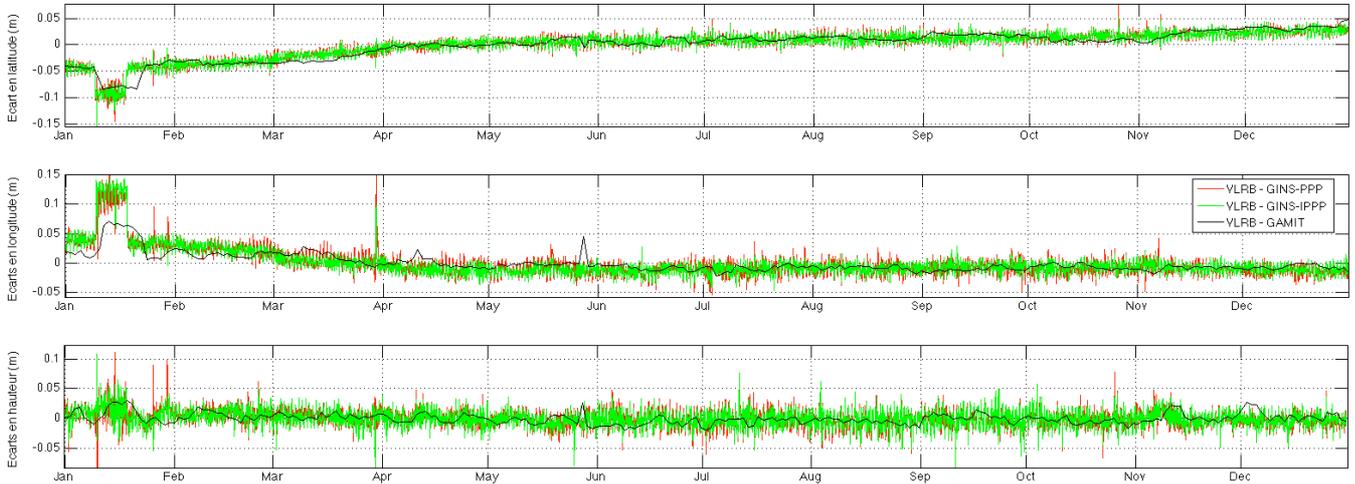


Figure 5.17 : Comparaison entre les évolutions de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP et GINS I-PPP horaire et une solution obtenue avec GAMIT

| | | | |
|--|---|----------------------------------|--|
| min écarts en Nord I-PPP (m) : -0.181 | max écarts en Nord I-PPP (m) : 0.051 | RMS en Nord I-PPP (m) : 0.025 | ecart moyen en Nord PPP - I-PPP (m) : 0.002 |
| min écarts en Nord PPP (m) : -0.145 | max écarts en Nord PPP(m) : 0.078 | RMS en Nord PPP (m) : 0.025 | |
| min écarts en Est I-PPP (m) : -0.047 | max écarts en Est I-PPP (m) : 0.145 | RMS en Est I-PPP (m) : 0.025 | ecart moyen en Est PPP - I-PPP (m) : 0.006 |
| min écarts en Est PPP (m) : -0.053 | max écarts en Est PPP(m) : 0.162 | RMS en Est PPP (m) : 0.025 | |
| min écarts en Hauteur I-PPP (m) : -0.093 | max écarts en Hauteur I-PPP (m) : 0.108 | RMS en Hauteur I-PPP (m) : 0.013 | ecart moyen en Hauteur PPP - I-PPP (m) : 0.006 |
| min écarts en Hauteur PPP (m) : -0.123 | max écarts en Hauteur PPP(m) : 0.110 | RMS en Hauteur PPP (m) : 0.014 | |

Etant donné que la station VLRB subit un fort déplacement technique au mois de janvier 2010, les statistiques en sont légèrement troublées, les valeurs efficaces sont biaisées.

Les mois de janvier, février et mars n'ont donc pas été pris en compte afin de ne traiter que la partie de

l'année où le glissement stagne, afin de ne comparer que la dispersion des deux solutions. Les RMS obtenus sont les suivants :

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| RMS en Nord I-PPP (m) : 0.011 | RMS en Nord PPP (m) : 0.011 |
| RMS en Est I-PPP (m) : 0.009 | RMS en Est PPP (m) : 0.011 |
| RMS en Hauteur I-PPP (m) : 0.013 | RMS en Hauteur PPP (m) : 0.013 |

La figure 5.18 permet de mieux visualiser la solution sur lorsque la figure 5.17 est agrandie pour ne montrer que les solutions sur un mois :

Séries temporelles de position durant 2010 de la station VLRB avec une solution PPP horaire, une autre solution IPPP horaire et la solution obtenue avec GAMIT

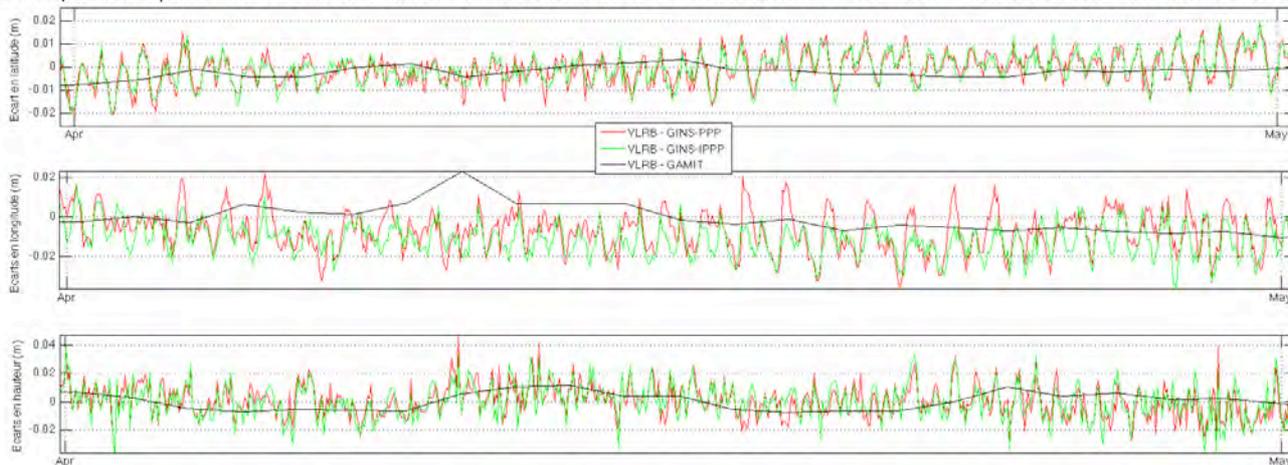


Figure 5.18 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire, une solution GINS I-PPP horaire et la solution GAMIT durant Avril 2010

Le résultat obtenu confirme une légère diminution d'amplitude des oscillations lorsque les ambiguïtés sont fixées, surtout en Est.

L'objectif désormais est d'observer les données en sortie du traitement I-PPP de GINS avec une solution par heure pour la station LVA2 et de les comparer avec les solutions PPP horaire réalisées par GINS et avec les solutions obtenues avec GAMIT.

Les séries temporelles de position de LVA2 réalisée par traitement I-PPP horaire et PPP horaires sont présentées par la figure 5.19 :

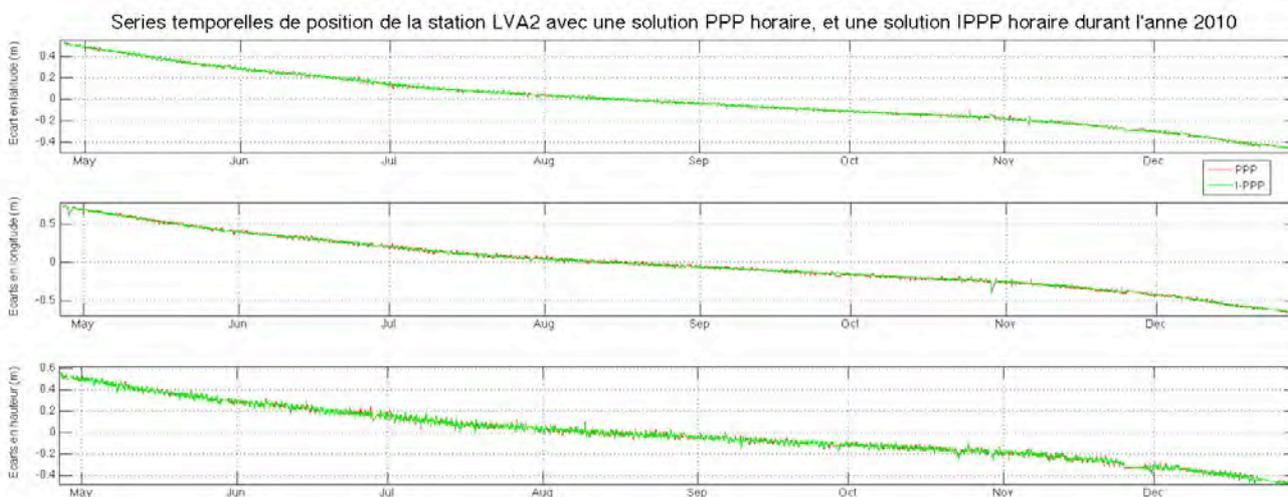


Figure 5.19 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant Avril 2010

| | | | |
|--|---|----------------------------------|--|
| min écarts en Nord I-PPP (m) : -0.467 | max écarts en Nord I-PPP (m) : 0.532 | RMS en Nord I-PPP (m) : 0.234 | ecart moyen en Nord PPP - I-PPP (m) : 0.003 |
| min écarts en Nord PPP (m) : -0.464 | max écarts en Nord PPP(m) : 0.528 | RMS en Nord PPP (m) : 0.234 | |
| min écarts en Est I-PPP (m) : -0.658 | max écarts en Est I-PPP (m) : 0.751 | RMS en Est I-PPP (m) : 0.330 | ecart moyen en Est PPP - I-PPP (m) : 0.008 |
| min écarts en Est PPP (m) : -0.675 | max écarts en Est PPP(m) : 0.753 | RMS en Est PPP (m) : 0.332 | |
| min écarts en Hauteur I-PPP (m) : -0.488 | max écarts en Hauteur I-PPP (m) : 0.561 | RMS en Hauteur I-PPP (m) : 0.241 | ecart moyen en Hauteur PPP - I-PPP (m) : 0.007 |
| min écarts en Hauteur PPP (m) : -0.436 | max écarts en Hauteur PPP(m) : 0.563 | RMS en Hauteur PPP (m) : 0.241 | |

Le suivi du glissement durant le semestre de données disponibles est toujours bien réalisé et les variations de vitesse durant les mois de mai, novembre et décembre sont bien visibles. Etant donné le fort déplacement de la station durant l'année, la valeur efficace actuelle ne donne pas d'informations exploitables. La seule valeur permettant de valider ce test est l'écart moyen séparant les deux solutions et ce dernier n'excède pas le centimètre. Par contre, comme il a été fait précédemment, il est possible de retirer du calcul de la solution la tendance de la courbe afin de déterminer les caractéristiques propres aux solutions PPP et I-PPP afin de pouvoir les comparer concrètement et obtenir une valeur vraie du RMS :

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| RMS en Nord I-PPP (m) : 0.007 | RMS en Nord PPP (m) : 0.008 |
| RMS en Est I-PPP (m) : 0.009 | RMS en Est PPP (m) : 0.013 |
| RMS en Hauteur I-PPP (m) : 0.017 | RMS en Hauteur PPP (m) : 0.019 |

Les valeurs efficaces sont nettement meilleures lorsque l'on réalise un traitement I-PPP plutôt qu'un traitement PPP. Par conséquent, que le mouvement du glissement soit lent ou rapide, le passage au traitement I-PPP a permis de diminuer légèrement les oscillations. Mais cette correction n'étant pas suffisante, ces oscillations de plusieurs centimètres ne sont pas uniquement le fruit de la non fixation des ambiguïtés flottantes. Ce spectre ne peut donc que, soit provenir du traitement GINS en lui-même, soit résulter d'un phénomène extérieur.

Pour résumer, plusieurs solutions de traitements I-PPP horaires se sont révélées cohérentes avec les solutions PPP horaires et journalières de la même station à la même époque. Le traitement I-PPP de données est donc parfaitement capable de suivre la dynamique d'une glissement de terrain, que ce mouvement soit rapide ou non (à la Valette ou à Villerville). Cependant, une certaine dispersion a été observée autour des solutions horaires, oscillations qui peuvent être légèrement diminuées d'environ 10% en utilisant la méthode de traitement I-PPP où les ambiguïtés sont entières.

Le prochain test va consister à obtenir de GINS un résultat lorsqu'il s'agit de calculer la position d'une station par calcul différentiel. Ce test permettra de tester ce logiciel dans ce domaine, mais pourra peut-être aussi apporter des réponses concernant ces oscillations.

4. Resultat de traitements différentiels avec GINS

Désormais, l'objectif est de tester le calcul en double différence de GINS. Ce premier test sera de calculer la station VLRB par double différence avec comme station de référence la station VLRV et de comparer ce résultat avec les séries temporelles de position de la station VLRB avec une solution I-PPP horaire. La figure 5.20 montre cette comparaison :



Figure 5.20 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS I-PPP horaire et une solution par double différence GINS avec la station VLRV comme référence durant la première semaine de Janvier 2010

Comme il est expliqué précédemment, l'avantage de la double-différence (positionnement relatif) est que lors de ce traitement, les erreurs communes, en particulier les erreurs de géométrie (erreurs ionosphérique et troposphérique, biais électroniques hardware des satellites et des récepteurs, décalage d'horloges satellite et récepteur...) sont éliminées et les ambiguïtés de phase sont fixées. Le traitement double-différence suppose implicitement qu'il y a la même erreur ionosphérique et troposphérique sur les deux stations, que l'horloge satellite et récepteur soient la même. Le système est bien contraint. Lorsque les coordonnées de la station de référence sont fixées, les coordonnées de l'autre station vont être déterminées simplement parce que l'hypothèse selon laquelle ces erreurs sont identiques aux deux points est faite. Ce qui est d'autant plus faux lorsque la ligne de base s'allonge. Sur une longue ligne de base, imposer cette même contrainte serait une erreur.

La figure 5.20 donne les indications suivantes concernant la comparaison des deux solutions :

| | |
|----------------------------------|--|
| RMS en Nord I-PPP (m) : 0.007 | ecart moyen en Nord DD - I-PPP (m) : 0.007 |
| RMS en Nord DD (m) : 0.004 | |
| RMS en Est I-PPP (m) : 0.009 | ecart moyen en Est DD - I-PPP (m) : 0.003 |
| RMS en Est DD (m) : 0.008 | |
| RMS en Hauteur I-PPP (m) : 0.011 | ecart moyen en Hauteur DD- I-PPP (m) : 0.001 |
| RMS en Hauteur DD (m) : 0.009 | |

Ces résultats montrent que la solution double-différence est cohérente avec la solution I-PPP horaire elle-même vérifiée par les tests précédents. La solution par traitement différentiel est moins diffuse que la solution I-PPP, les RMS sont plus faibles pour la solution différentielle. Malgré tout, la solution absolue montre que le traitement par I-PPP est une réelle alternative au traitement double-différence.

La question qui se pose désormais est de savoir s'il est possible d'obtenir un résultat encore meilleur que les résultats différentiels. Avec une analyse des oscillations observées sur les solutions I-PPP, va permettre de réaliser un test supplémentaire.

5. Resultat par différence de solutions I-PPP

Les oscillations qui provoquent cette dispersion inévitable sur les solutions par traitement I-PPP ou PPP semblent être corrélées d'une station à une autre (figure 4.21) :

Comparaison entre les oscillations observées lors du traitement I-PPP de la station CAEN et celles apparues lors du traitement I-PPP de la station VLRV du 01/01/2010 au 09/01/2010.

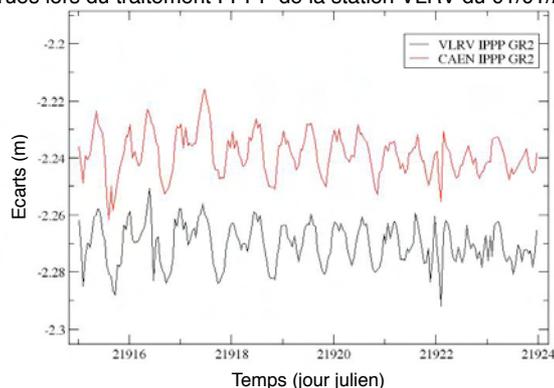


Figure 5.21 : Comparaison entre les oscillations observées lors du traitement I-PPP de la station CAEN et celles apparues lors du traitement I-PPP de la station VLRV

Par conséquent, le signal enregistré ne semble pas être aléatoire et appuie la thèse d'un phénomène physique. Pour l'instant, sachant que VLRV et CAEN sont distantes de 50km, il est très probable que les stations VLRH et VLRB le subissent également et ce dans les mêmes proportions.

L'idée de ce test est donc de soustraire deux à deux les séries temporelles de position des stations VLRB et VLRH avec une solution I-PPP horaire afin de supprimer en partie ces oscillations qui pour l'instant restent sans explication.

La figure 5.22 montre le résultat de la différence de solutions I-PPP horaire et permet de s'assurer de la corrélation des oscillations entre VLRV et VLRB. La différence des deux solutions offre ces statistiques comparées aux résultats des séries temporelles de position de la station VLRB avec une solution I-PPP horaire et aux résultats issus du calcul double-différence VLRV-VLRB réalisé avec GINS précédemment :

Comparaison entre les séries temporelles de position de VLRV et VLRB et la différence des deux séries temporelles VLRV-VLRB durant le mois d'Avril 2010

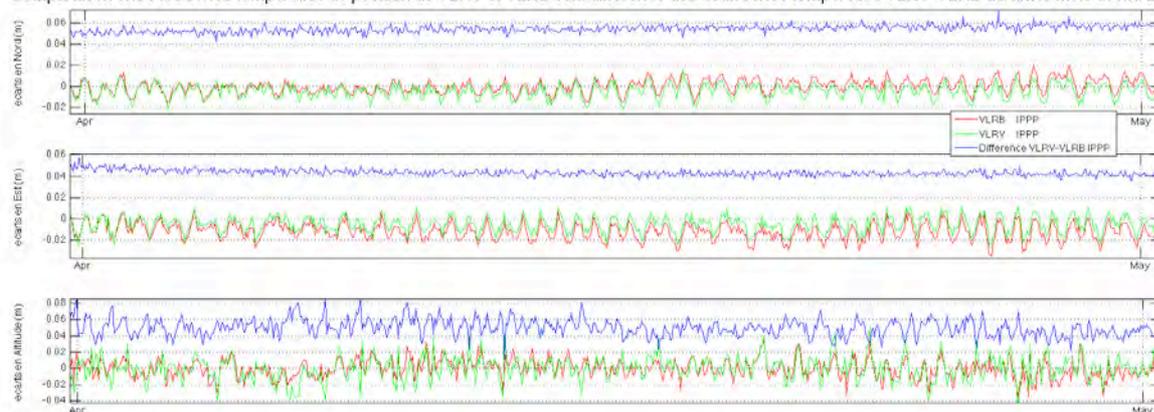


Figure 5.22 : Comparaison entre les séries temporelles de position de VLRV, VLRB et la différence de ces dernières durant le mois d'avril 2010

RMS en Nord I-PPP [VLRB] (m) : 0.007
 RMS en Nord Différence I-PPP [VLRV-VLRB] (m) : 0.005
 RMS en Nord DD (m) : 0.004

RMS en Est I-PPP [VLRB] (m) : 0.009
 RMS en Est Différence I-PPP [VLRV-VLRB] (m) : 0.005
 RMS en Est DD (m) : 0.008

RMS en Hauteur I-PPP [VLRB] (m) : 0.011
 RMS en Hauteur Différence I-PPP [VLRV-VLRB] (m) : 0.009
 RMS en Hauteur DD (m) : 0.009

La solution est très proche du résultat par double-différence voire meilleur. Cependant cette méthode élimine un grand avantage du calcul PPP, à savoir l'absence de nécessité de station de référence.

Toujours en suivant notre modèle opératoire, les séries temporelle sur l'année 2010 de position de la station LVA2 par différence de solution IPPP entre BACT ont été calculée et donne le résultat présenté par la figure 5.23 :

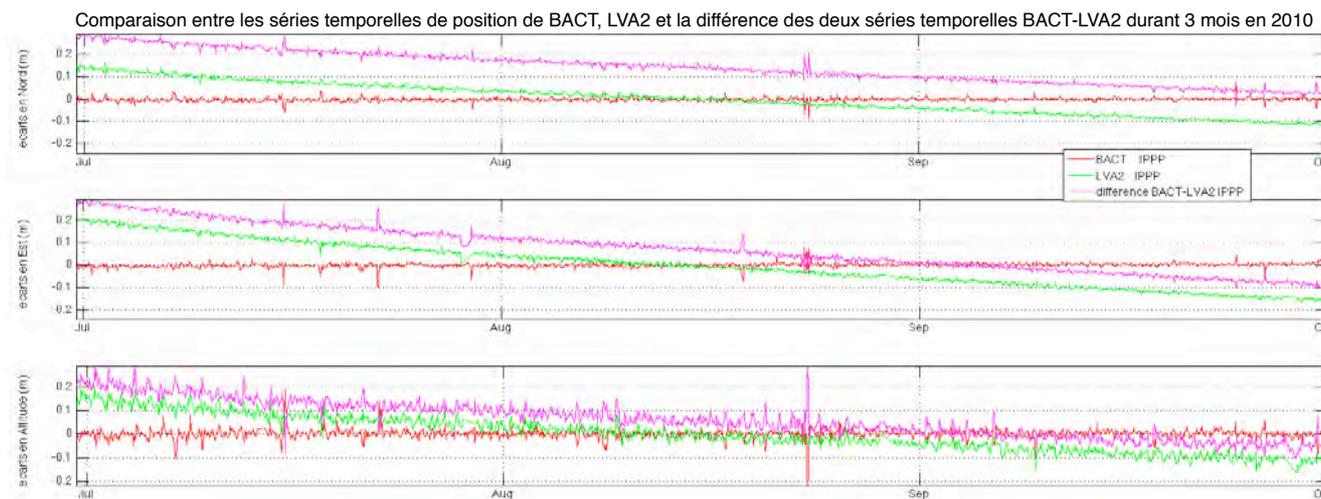


Figure 5.23 : Comparaison entre les séries temporelles de position de BACT, LVA2 et la différence de ces dernières durant 3 mois en 2010

RMS en Nord I-PPP [LVA2] (m) : 0.007
 RMS en Nord Différence I-PPP [BACT-LVA2] (m) : 0.008

RMS en Est I-PPP [LVA2] (m) : 0.009
 RMS en Est Différence I-PPP [BACT-LVA2] (m) : 0.0010

RMS en Hauteur I-PPP [LVA2] (m) : 0.017
 RMS en Hauteur Différence I-PPP [VLRV-VLRB] (m) : 0.020

Les oscillations observées sur les séries temporelles de position des stations LVA2 et BACT ne semblent pas être corrélées au même titre que celles qui sont enregistrées à Villerville. Le résultat de différence de solutions I-PPP est donc logiquement troublé.

Pour résumer l'avancement de cette étude, le logiciel GINS a été testé lors de :

- traitements PPP avec une solution par jour et une solution par heure,
- traitements I-PPP avec une solution par heure,
- un calcul de double-différence via GINS,
- des différences de solution I-PPP horaire,

et une comparaison a été faite entre tous les résultats afin de bien analyser comment obtenir la meilleure solution possible en traitant des données par positionnement ponctuel précis. En voici un récapitulatif sous la forme de la figure 5.24.

Comparaison des solutions selon la composante Nord des différentes méthodes de traitement du 01/01/2010 au 09/01/2010

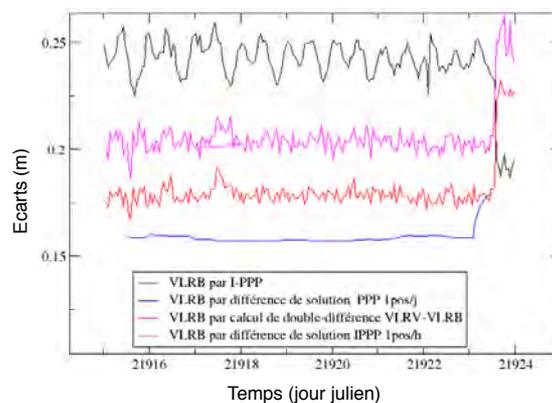


Figure 5.24 : Comparaison des solutions selon la composante Nord des différentes méthodes de traitement utilisées dans cette étude

Les solutions issues d'un calcul différentiel donnent donc de meilleurs résultats. Mais que les solutions I-PPP ne sont pas en reste, pour du positionnement "quasiment absolu", le résultat est plus que satisfaisant. L'unique problème survient lors de l'apparition d'oscillations centimétriques. En effet, elles ne semblent pas provenir du calcul de GINS car elles ne sont pas exactement les mêmes à Villerville, et à La Valette, mais en plus de cela, elles n'apparaissent plus lors du calcul différentiel. Par conséquent, l'origine de ces oscillations est un phénomène extérieur à GINS.

Ces oscillations seront le dernier sujet analysé dans ce travail.

6. Analyse des oscillations

Lorsque l'on effectue des calculs en PPP avec en sortie une solution journalière, le phénomène n'est pas visible. En réalité, les oscillations existent, mais la solution journalière obtenue n'est qu'une valeur représentative des données issue de mesures effectuées toutes les 30s. Autrement dit, cette méthode permet d'obtenir une position claire, mais pour le moins peu précise par rapport à un échantillonnage horaire. Les résultats obtenus lorsque par traitement PPP avec une solution horaire se révèlent beaucoup plus transparents que ceux à solution journalière. Les amplitudes de ces oscillations peuvent atteindre 4 cm en planimétrie et 7 cm en altimétrie. La figure 5.25 montre les séries temporelles de position durant le mois de mars des stations CAEN et LVAL :

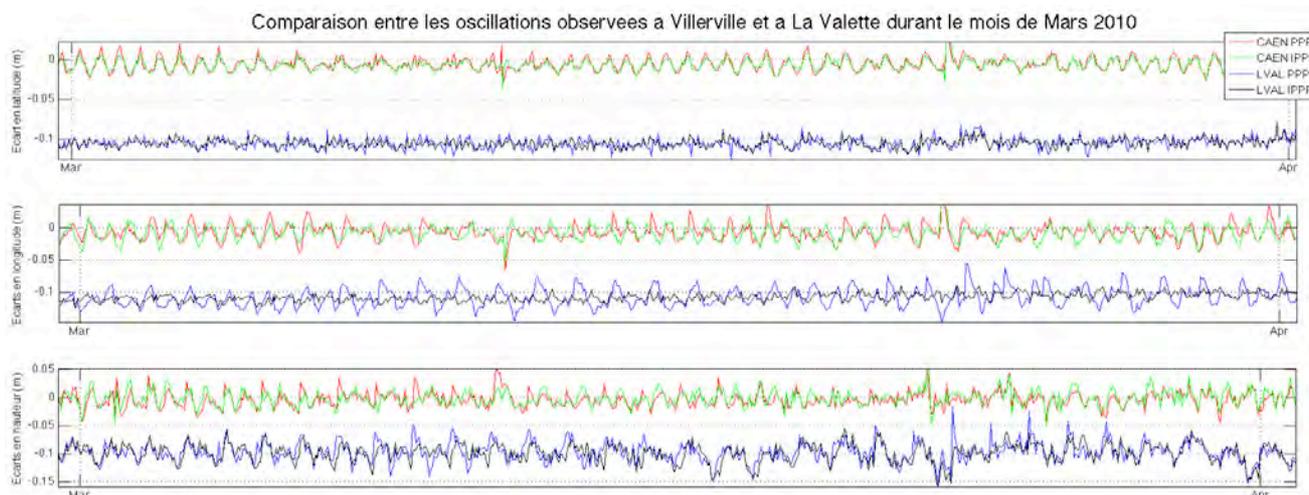


Figure 5.25 : Mise en évidence des oscillations présentes dans les séries temporelles de position des régions de Villerville et de La Valette par traitement PPP ou I-PPP avec une solution horaire durant le mois de Mars 2010

La première analyse qui peut être faite sur ces oscillations est que ces dernières semblent avoir des amplitudes qui varient aléatoirement. Ce qui se passe à Caen n'est pas directement corrélé avec ce qui se passe à La Valette. Par conséquent, le premier test concernant ces oscillations va être de mettre en relation les conditions climatiques et météorologiques du site en question avec l'évolution des amplitudes des oscillations. A l'aide des données obtenues concernant la pluviométrie et les températures au cours de l'année 2010, les figures 5.26 et 5.27 ont été obtenues :

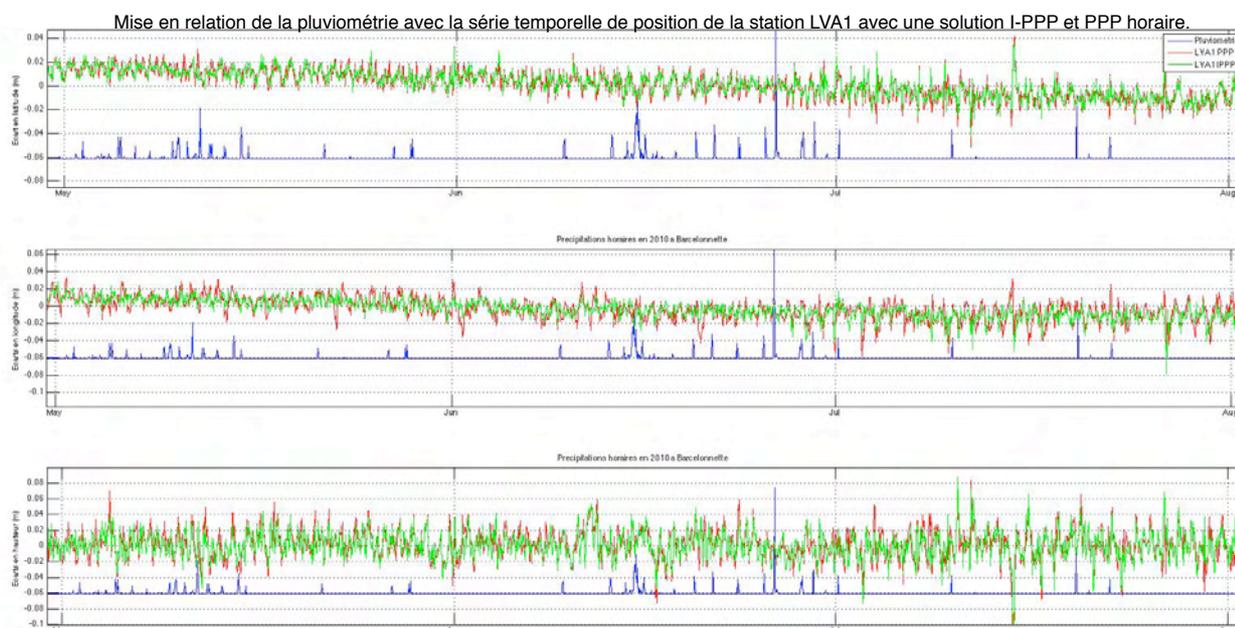


Figure 5.26 : Mise en relation de la pluviométrie avec les oscillations de la série temporelle de position de la station LVA1 en PPP et I-PPP durant 2010

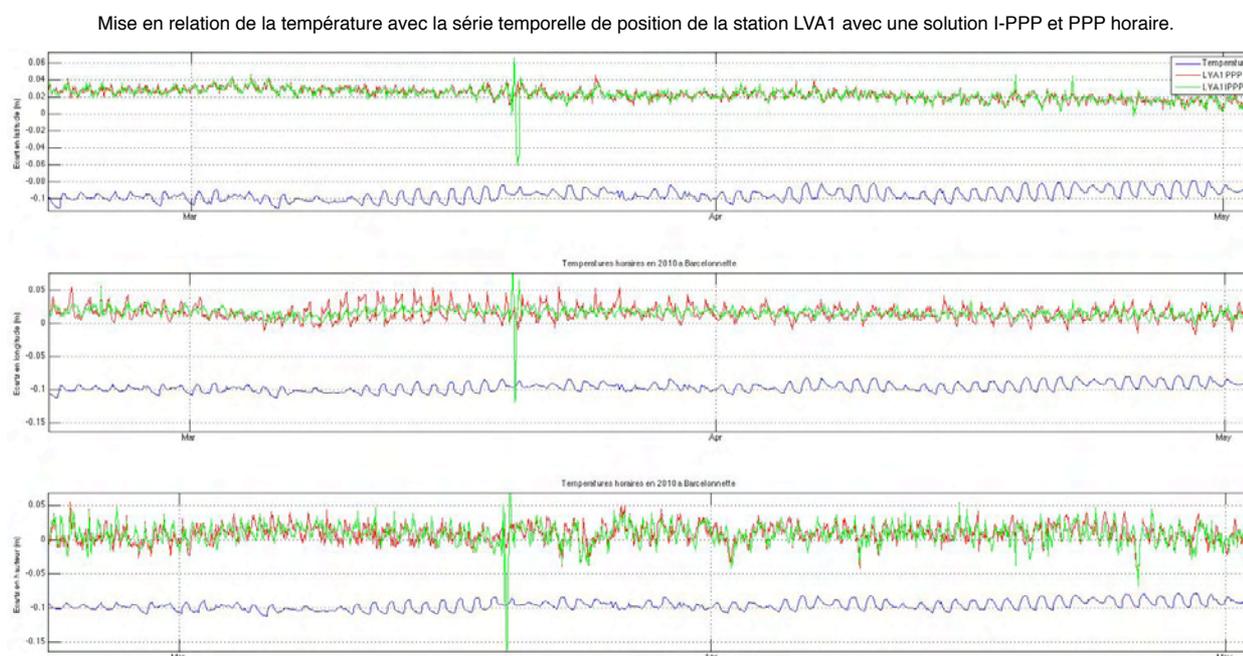


Figure 5.27 : Mise en relation de la température avec les oscillations de la série temporelle de position de la station LVA1 en PPP et I-PPP durant 2 mois

Il semblerait qu'aucune corrélation existe entre ces deux séries temporelles, que cela soit au niveau de la pluviométrie qu'au niveau des températures. Cette possibilité est donc écartée.

Etant donné que ces oscillations paraissent le fruit d'un signal possiblement périodique, la première chose à faire est de déterminer cette période afin d'obtenir des indices sur le caractère de ces oscillations. Il se trouve que la période de ce signal n'est pas exactement journalière : elle est de 24h 50min. Ce signal pourrait très bien correspondre à un phénomène de marée. Il était possible qu'un effet de marées océaniques soit subi par nos stations. En effet, la force génératrice des marées peut être développée en une suite de termes rigoureusement périodiques par rapport au temps. A chaque fréquence de ce spectre correspond une marée partielle de même période, appelée onde ou composante. Chacune de ces ondes a reçu un nom de code : M2 (période 12h25min) correspond à la marée due au mouvement moyen apparent de la Lune, S2 (12h) à celui du Soleil, N2 (12h39min) à l'ellipticité de l'orbite lunaire, K2 (11h58min) à l'inclinaison de l'écliptique et de

l'orbite lunaire par rapport à l'équateur, O1 (25h49min) est la composante lunaire diurne principale et K1 (23h56min) la composante luni-solaire déclinatoire (Heimlich et al., 2014). Si les marées terrestres sont bien connues car elles ont une structure simple, il n'en va pas de même pour les déformations terrestres causées par les marées océaniques appelée effets de surcharge océanique. La figure 5.28 suivante nous montre l'ampleur des déformations causées selon les 3 composantes :

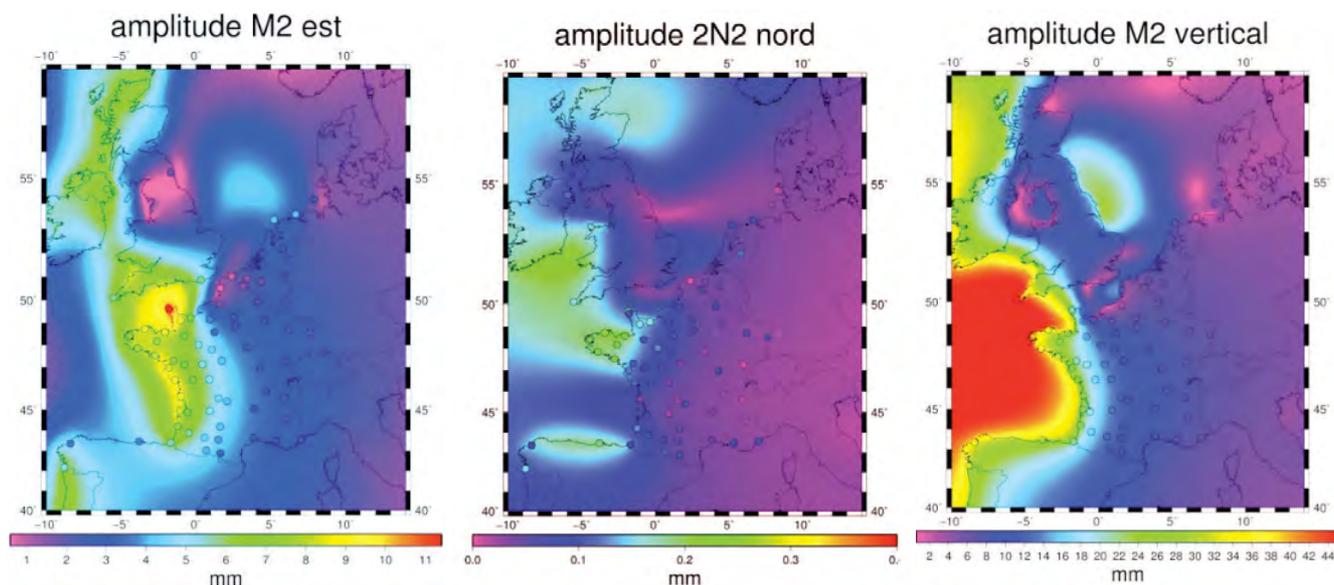


Figure 5.28 : Amplitude du déplacement lié à l'effet de charge océaniques des ondes M2 et 2N2 sur la croûte terrestre de janvier 2009 à janvier 2011 (Heimlich et al., 2014)

Sur le continent, l'amplitude verticale totale de la surcharge est d'ordre centimétrique. Elle est maximale près des côtes (7 cm à Brest par exemple). Les déplacements de masse d'eau sont maximaux au niveau de la Manche et de l'Océan Atlantique pour les ondes semi-diurnes (M2). Elle est de l'ordre de 1 cm à Strasbourg, à 1000 km de Brest. La correction de l'effet de surcharge océanique est donc à prendre en compte pour toute étude fine de positionnement, de déformation ou pour les autres applications du GNSS (Heimlich et al., 2014).

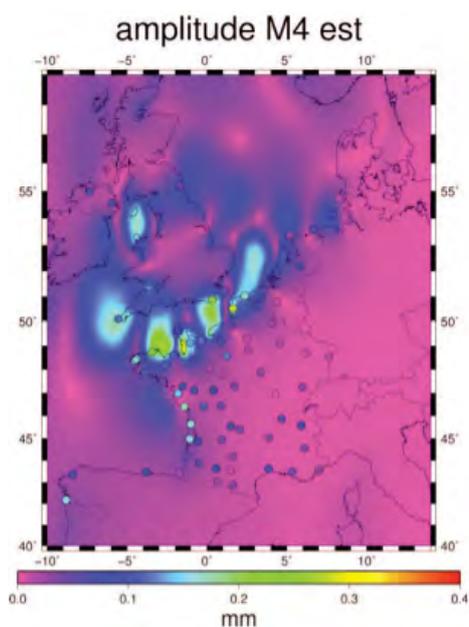


Figure 5.29 : Amplitude du déplacement lié à la surcharge de l'onde M4 de janvier 2009 à janvier 2011 (Heimlich et al., 2014)

Les marées sont engendrées par l'attraction différentielle entre un point quelconque de la Terre et le centre de la Terre. Elles sont principalement dues à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil et à la rotation de la Terre. La périodicité est fonction de la distance à l'astre, de sa vitesse angulaire relative, de sa déclinaison et de la variation temporelle de ces paramètres. De plus, il existe des composantes non harmoniques des marées océaniques qui résultent d'interactions non-linéaires de composantes entre elles. Cela se produit sur les plateaux continentaux où l'amplitude de marée est amplifiée, comme par exemple dans la Manche ou la Mer Noire. L'onde M4 (figure 5.29) en est un exemple, elle résulte de l'interaction de M2 avec elle-même (Heimlich et al., 2014).

Des modèles de marée existent comme FES2004 (*Finite Element Solution*) utilisé pour corriger l'effet de surcharge océanique. C'est une grille avec une valeur d'amplitude et de phase à chacun de ses points (figure 5.3).

Ceci pourrait être l'explication de ces oscillations. En effet, avec une période de 24h50min, soit deux fois la période des ondes M2, cette composante pourrait être à l'origine des perturbations observées. De plus, ces oscillations ne sont pas constantes au cours du temps, aspect qui pourrait être expliqué par l'intervention des ondes M4 qui viendraient se conjuguer aux ondes M2. Cela expliquerait également l'observation d'un phénomène différent mais aux mêmes caractéristiques sur le site de la Valette.

Cependant, le modèle de correction des effets de charges océaniques possible avec GINS était en cours de développement et n'a pas pu être utilisé lors de notre étude. Un calcul unique de correction nous a juste permis de valider la théorie des effets de marées subis par nos stations dont le résultat est présenté par la figure 5.31 :

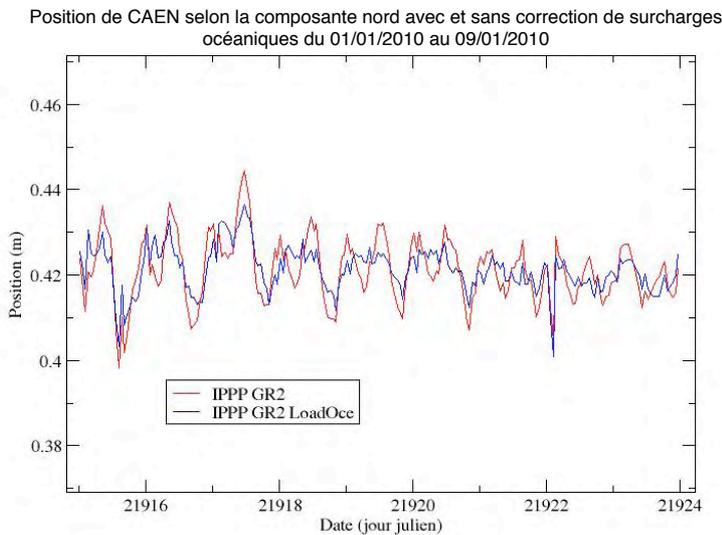


Figure 5.31 : Comparaison des séries temporelles sur 10 jours de position de la station de CAEN selon la composante Nord avec et sans correction d'effet de surcharge océanique

amplitude M2 FES04

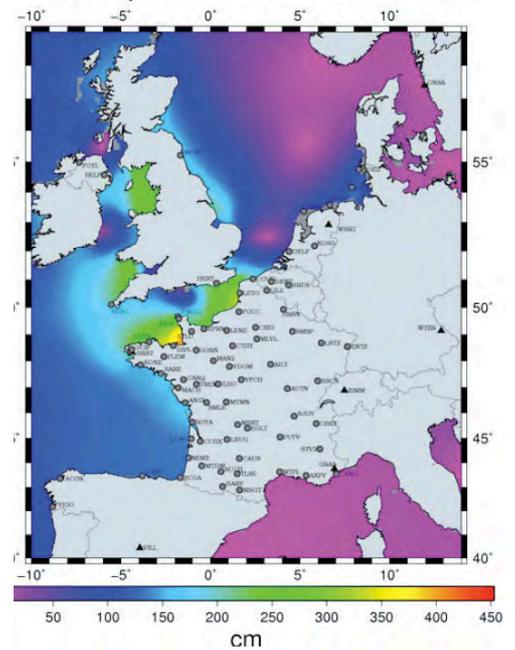


Figure 5.30 : Onde de marée océanique M2 d'après le modèle FES2004 [2014] (Heimlich et al, 2014)

Une diminution de l'amplitude des oscillations est observable mais pas l'élimination complète du phénomène.

La cause de ces oscillations est intimement liée à un phénomène de marée. Cependant, ceci résume l'intégralité de nos connaissances à ce sujet. En effet, avec GINS en cours de développement et le temps qui nous était imparti, la cause de ces perturbations n'a pas été expliquée.

VI. Conclusion

L'Observatoire Multi-disciplinaire des Instabilités de Versant a pour mission l'analyse et la surveillance de 5 glissements de terrain en France : Super-Sauze, la Clapière, la Valette (Alpes-de-Haute-Provence), Mas d'Avignonet (Rhône-Alpes), et Villerville (Basse-Normandie). La surveillance de ces sites est essentielle pour comprendre les mécanismes des glissements de terrain, et prédire leur comportement dans le temps et l'espace. L'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg, membre actif de l'OMIV, a reçu un nouveau code de traitement appelé GINS, créé par le Centre National d'Etudes Spatiales, qui peut traiter des données GPS et obtenir des coordonnées d'une station de manière isolée. Cette technique s'appelle le Positionnement Ponctuel Précis (PPP). Jusqu'à présent, le suivi continu des glissements de terrain cités précédemment se faisait à l'aide de stations GPS permanentes placées au niveau et en dehors des zones sujettes à glissement. Le traitement de ces mesures GPS se faisait à l'aide d'un logiciel appelé GAMIT/GLOBK qui permet la détermination des coordonnées des stations GPS par calcul différentiel. La nécessité d'une station de référence apparaît comme un frein à l'étude de ces glissements. De plus, ces derniers en questions sont diverses et variés et ont des caractéristiques bien différentes. Certains sont rapides, certains sont lents, certains sont constants, et d'autres non. Cette diversité pose beaucoup de problème à un code comme GLOBK qui est un filtre Kalman, un filtre prédictif qui n'est pas performant lors de forts déplacements. Pour ces raisons, le logiciel GINS semble sonner le renouveau de cette méthode d'observation.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la solution d'un traitement PPP avec GINS dans le but d'obtenir un suivi continu des stations GPS permanentes afin de suivre n'importe quel glissement de terrain sans le moindre calcul en réseau.

Cette étude se résume donc à un ensemble de tests permettant d'analyser les résultats d'un traitement en PPP via GINS avec comme données en entrées les fichiers d'observation GPS des différentes stations sujettes au glissement de terrain.

Une méthodologie a été établie concernant la stratégie à adopter pour un test complet des capacités du logiciel étudié. Chaque test a été d'abord essayé sur une station «fixe» et stable afin de vérifier la cohérence et la justesse des données en sortie du traitement GINS. Ce rôle de station fixe a été joué par la station RGP de l'IGN de la ville de Caen nommée CAEN. Ensuite, cette stratégie de calcul a été élargie à l'ensemble des stations du glissement de Villerville (VLRV située en zone stable à l'extérieur du glissement, VLRH en haut du glissement et VLRB en zone basse du glissement) afin d'obtenir un résultat lors de l'étude de glissements de faible intensité. Pour finir, les tests ont été appliqués aux données des stations de la zone du glissement de La Valette (LVAL située à l'extérieur du glissement, LVA1 au pied et LVA2 au sommet) qui est une zone où les glissements sont importants. Ces deux sites ont été ceux privilégiés dans cet étude en raison de leurs caractéristiques totalement opposées : le glissement de Villerville est un glissement assez constant et lent (environ 5 cm de déplacement en un an), à 100 m des côtes Atlantiques, alors que le glissement de La Valette est un glissement rapide et inconstant (environ 150 cm en un an) au niveau des Alpes du Sud. Cela permet de voir le comportement du traitement GINS dans deux cas de figures extrêmes. Il a été choisi d'analyser nos réponses sur une durée annuelle pour chaque test. L'année étudiée durant ce travail est l'année 2010 car c'est elle qui présente le plus de données communes à toutes nos stations.

Des traitements GINS PPP à solution journalière ont été étudiés et ont démontré que pour n'importe quel type de glissement, la solution obtenue est très proche de la solution de GAMIT et retranscrit correctement tous déplacements de la station observée. Cependant, pour des mesures de suivi de glissement de terrain, il peut apparaître plus judicieux d'utiliser un échantillonnage horaire afin d'obtenir un suivi continu plus complet. Alors des traitements GINS PPP à solution horaire ont été réalisés sur les stations des deux sites. Le constat est le même que pour le test précédent, cependant, des oscillations d'une amplitude variable allant jusqu'à 5 cm apparaissent dans nos séries temporelles. L'hypothèse de la cause de ces oscillations a été la non-fixation des ambiguïtés à valeurs entières. Le test suivant a donc corrigé ce paramètre.

Des tests ont été effectués en traitant les données GPS par la méthode du I-PPP via GINS. Les résultats obtenus concernant le suivi des déplacements est identique aux ceux obtenus durant les premiers tests de PPP. La différence notable est une diminution d'environ 10% de l'amplitude des oscillations. Par conséquent,

le passage à des ambiguïtés entières à diminuer ces perturbation, mais ne les a pas éliminer. Ce phénomène est donc soit lié au traitement de GINS lui-même, soit à un facteur extérieur aux calculs de GINS (phénomène physique).

Un calcul de double différence via GINS a été réalisé et comparé à un traitement I-PPP. Le résultat a démontré que le calcul double-différence obtenait de meilleures valeurs efficaces que le résultat par I-PPP, les oscillations ont été éliminée. Grâce à ce test de double différence, la disparition des oscillations renforce l'hypothèse d'une cause extérieure au calcul de GINS.

Enfin, une corrélation des oscillations entre les stations d'une même zone géographique et la volonté d'obtenir une solution quasi-parfaite ont motivé un nouveau test de calcul de différence de solution I-PPP. Ce test s'est révélé très bon avec des RMS proches du résultat par double différence voire meilleurs au niveau de Villerville.

Enfin l'analyse des oscillations, de leur caractère périodique et de leur allure a prouvé un lien direct avec les marées océaniques, lien confirmé par la diminution de ces dernières lorsque l'on applique une correction de surcharge océanique sur les calculs de GINS. Cependant, ce phénomène n'est pas éliminé et sa cause reste incomprise.

Le Positionnement Ponctuel Précis apparait aujourd'hui comme une nouvelle alternative de mesure GNSS de précision. A travers les tests réalisés, il a été prouvé que cette méthode de positionnement est une grande évolution dans le domaine de la géodésie. Avoir la possibilité d'obtenir un positionnement quasiment en temps réel (j+1) sans la nécessité d'une station de référence est un grande découverte. A l'aide du logiciel GINS, nous avons aujourd'hui un outil de mesure très puissant. Il combine les avantages des mesures GPS, à savoir l'obtention avec une grande précision des positions de stations à n'importe quel moment, où que l'utilisateur soit, et une facilité d'utilisation très proche de la géodésie de navigation.

Il faut l'admettre, les précisions obtenues avec un traitement PPP ne peuvent pas être à la hauteur des solutions par double-différence. Lorsque la possibilité d'avoir une station connue avec précision existe à une distance inférieure à une vingtaine de kilomètres de la station que l'on souhaite calculer, le méthode de calcul par double-différence reste la méthode reine en offrant une précision millimétrique. A partir de 20km, la méthode du PPP devient intéressante, sa précision est indépendante de toute ligne de base et offre donc une plus grande liberté en ce qui concerne la zone à étudier.

La solution qui parait la plus adéquat dans le cas des glissements de terrain observé reste le calcul différentiel. L'unique problème qui pourrait être résolu par le PPP se situe au niveau de la correction des erreurs ionosphériques. La méthode du calcul différentiel est basée sur le postulat qui dit que les deux stations sont surplombées par la même ionosphère. Or cela est vrai lorsque les points sont proches, mais cela devient faux si les altitudes changent. Et dans le cas précis de notre étude, les altitudes varient énormément, entre LVAL et LVA2, il y a plus de 800mètres de dénivelé. Cela fausse le résultat différentiel. La mesure PPP est corrigée de l'effet ionosphérique grâce à la combinaison iono-free à l'aide de la deuxième mesure de phase.

GINS est encore en cours de développement. C'est un outils très puissant qui pour l'instant a été mis à la disposition des utilisateurs afin que ces derniers réalisent quelques tests permettant d'améliorer encore son utilisation. Un grand nombre de mises à jour ont lieu et il serait dangereux de tirer des conclusions hâtives. Il faut savoir que les tests effectués dans cette étude n'ont jamais été réalisés auparavant et que nos résultats sont une première dans la recherche de solution adéquat pour l'analyse cinématique de glissements de terrain.

VII. Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Philippe MALET de m'avoir fait confiance pour ce projet, et de m'avoir épauler dans la rédaction de ce rapport. Malgré son poste et ses responsabilités, il a su être présent et diriger ce stage avec intérêt.

De plus, je souhaite également remercier Patrice ULRICH, qui a toujours été attentif au moindre avancement du stage et présent à la moindre interrogation, ainsi que Gilbert FERHAT, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, qui a également été disponible au moindre problème rencontré et qui a grandement participé aux avancés du projet.

Je voudrais également adressé un grand merci à Mr Félix Perosanz. Sans lui, ce projet n'aurait surement pas pu aboutir. Merci pour m'avoir accueilli dans les locaux du CNES, de m'avoir accordé toute une semaines de son temps sans compter le temps pris pour répondre à nos nombreux mails, et de m'avoir inculquer un grand nombre de connaissances géodésiques que j'avais toujours eu du mal à acquérir.

Puis, j'adresse mes remerciements à Jérôme VERDUN, enseignant à l'ESGT, pour m'avoir aiguillé durant ce travail de fin d'étude en tant que professeur référent.

Mes derniers remerciements s'adressent à Yann ZIEGLER et Eric HENRION, tous deux à l'École et Observatoire des Sciences de la Terre. Leur aide a grandement contribué à la réussite de ce stage, et pouvoir échanger avec eux fut une expérience stimulante tout au long de mon travail.

VIII. Table des illustrations

Tableau 2.1 : Caractéristiques des principales méthodes de suivi des déplacements. (Déprez, 2010)

Tableau 3.1 : Tableau comparatif des logiciels GAMIT, GINS et GIPSY

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des tests effectués durant cette étude

Figure 2.1 : Positions des différentes stations de l'IGS sur la planète (Perosanz et al., 2013)

Figure 2.2 : Ensemble des données récupérées par l'IGS (Perosanz et al., 2013)

Figure 2.3 : Démarche à suivre par l'utilisateur afin de pouvoir fixer les ambiguïtés (Perosanz et al., 2013)

Figure 3.1 : Organigramme général du logiciel GINS présenté lors de la conférence GINS training en 2013

Figure 3.2 : Position des stations GPS de surveillance du glissement de Villerville (VLRV, VLRB, VLRLH) selon l'OMIV [2014]

Figure 3.4 : Position des stations GPS de surveillance du glissement de La Valette (LVAL, LVA1, LVA2) selon l'OMIV [2014]

Figure 4.1 : Zone de glissement de Villerville d'après l'OMIV [2014]

Figure 4.2 : Evolution des lignes de base entre les stations de Villerville en 2010 d'après les sources d'OMIV [2014]

Figure 4.3 : Zone de glissement de La Valette d'après l'OMIV [2014]

Figure 4.4 : Evolution des lignes de base entre les stations de La Valette en 2010 selon les sources d'OMIV [2014]

Figure 4.5 : Position des différents récepteurs GPS sur le glissement de la Clapière d'après El Bedoui et al., 2009

Figure 4.6 : Evolution des lignes de base entre les stations de La Clapière en 2011 selon l'OMIV [2014]

Figure 4.7 : Positions des stations GPS permanentes de la zone de glissement de La Super-Sauze selon l'OMIV [2014]

Figure 4.8 : Evolution des lignes de base entre les stations de Super-Sauze en 2011 selon l'OMIV [2014]

Figure 4.9 : Positions des stations GPS permanentes de la zone de glissement de Mas d'Avignonet selon l'OMIV [2014]

Figure 4.10 : Evolution des lignes de base entre les stations de Mas d'Avignonet en 2010 selon les sources d'OMIV [2014]

Figure 5.1 : Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Figure 5.2 : Evolution de la position de la station VLRV avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Figure 5.3 : Evolution de la position de la station VLRH avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Figure 5.4 : Evolution de la position de la station VLRB avec une solution GINS PPP par jour en 2010

Figure 5.5 : Comparaison entre la ligne de base VLRV-VLRB avec une solution PPP journalière via GINS et celle calculée avec GAMIT par calcul différentiel en 2010

Figure 5.6 : Comparaison entre la ligne de base VLRV-VLRB avec une solution PPP journalière via GINS et celle calculée avec GAMIT par calcul différentiel durant le second semestre de 2010

Figure 5.7 : Evolution des coordonnées de la station LVA2 avec une solution GINS PPP par jour comparées aux résultats donnés par GAMIT en 2010 durant 2010

Figure 5.8 : Comparaison des séries temporelles de position de position de la station CAEN par traitement PPP avec des produits historiques GRG et GR2 sur une dizaine de jours

Figure 5.9 : Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par heure en 2010

Figure 5.10 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et journalière en 2010

Figure 5.11 : Evolution de la position de la station CAEN avec une solution GINS PPP par heure durant 3 mois

Figure 5.12 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINSPPP par jour durant 2010 journalière en 2010

Figure 5.13 : Comparaison entre l'évolution de position de la station LVA2 avec une solution PPP horaire et une solution PPP par jour durant 2010

Figure 5.14 : Agrandissement de la figure 5.13 au niveau du mois de juin 2010

Figure 5.15 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant 2010

Figure 5.16 : Comparaison entre l'évolution de position de la station CAEN avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant Avril 2010

Figure 5.17 : Comparaison entre les évolutions de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP et GINS I-PPP horaire et une solution obtenue avec GAMIT

Figure 5.18 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire, une solution GINS I-PPP horaire et la solution GAMIT durant Avril 2010

Figure 5.19 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS PPP horaire et une solution GINS I-PPP horaire durant Avril 2010

Figure 5.20 : Comparaison entre l'évolution de position de la station VLRB avec une solution GINS I-PPP horaire et une solution par double différence GINS avec la station VLRV comme référence durant la première semaine de Janvier 2010

Figure 5.21 : Comparaison entre les oscillations observées lors du traitement I-PPP de la station CAEN et celles apparues lors du traitement I-PPP de la station VLRV

Figure 5.22 : Comparaison entre les séries temporelles de position de VLRV, VLRB et la différence de ces dernières durant le mois d'avril 2010

Figure 5.22 : Comparaison entre les séries temporelles de position de VLRV, VLRB et la différence de ces dernières durant le mois d'avril 2010

Figure 5.24 : Comparaison des solutions selon la composante Nord des différentes méthodes de traitement utilisées dans cette étude

Figure 5.25 : Mise en évidence des oscillations présentes dans les séries temporelles de position des régions de Villerville et de La Valette par traitement PPP ou I-PPP avec une solution horaire durant le mois de Mars 2010

Figure 5.26 : Mise en relation de la pluviométrie avec les oscillations de la série temporelle de position de la station LVA1 en PPP et I-PPP durant 2010

Figure 5.27 : Mise en relation de la température avec les oscillations de la série temporelle de position de la station LVA1 en PPP et I-PPP durant 2 mois

Figure 5.28 : Amplitude du déplacement lié à l'effet de charge océaniques des ondes M2 et 2N2 sur la croûte terrestre de janvier 2009 à janvier 2011 (Heimlich et al., 2014)

Figure 5.29 : Amplitude du déplacement lié à la surcharge de l'onde M4 de janvier 2009 à janvier 2011 (Heimlich et al., 2014)

Figure 5.30 : Onde de marée océanique M2 d'après le modèle FES2004 [2014] (Heimlich et al., 2014)

Figure 5.31 : Comparaison des séries temporelles sur 10 jours de position de la station de CAEN selon la composante Nord avec et sans correction d'effet de surcharge océanique

IX. Références

- BALDI et al. **Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data.** *Geomorphology*, 2008. n°102, p435-444.
- BENOUIS D. E. **Etude d'un glissement de terrain par différentes méthodes.** Université de Saida (Algérie). Ingénieur d'état en génie civil option Construction Civile et Industrielle. 2010. p12-25. - (http://www.memoireonline.com/09/10/3867/m_Etude-dun-glissement-de-terrain-par-differentes-methodes1.html)
- CLEFS CEA. **Chapitre III : La Terre en mouvement.** N°= 57 Hiver 2008-2009. p90 [III. La terre en mouvement - CEA](#)
- COMBES F. - GOUGENHEIM A. - LE PROVOST C. - ZAHN J.-P. **Chapitre 4 Les marées océaniques et leur prédiction par la méthode harmonique.** *Les marées* [2014]
- DEPREZ A. **Caractérisation de la cinématique de glissements de terrain par mesure GPS en continu et modélisation mécanique.** Application aux sites de La Valette et de Villerville. Rapport de stage de Master 2. p1-15. - (http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/Deprez_2010_MsCThesis-EOST.pdf)
- DUQUENNE F. **Chapitre 1 : Le Système GPS : notions fondamentales. GPS localisation et navigation par satellite.** 2ème édition revue et augmentée. 2005. Lavoisier. Hermes-Sciences. p13-68.
- EL BEDOUI S. - LEBOURG T. - PEREZ J.L. - VATTY P. **Travaux de recherche** (<http://gravitaire.oca.eu/spip.php?rubriquer170>)
- FUND F. - PEROSANZ F. - TESTUT L. - LOYER S. **An Integer Precise Point Positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy.** 2012. Présentation sous diapositives
- GENG J. - MENG X. - DODSON A.-H. - TEFERLE F. **Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison.** 2010. p1-13
- GILI et al. **Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring.** *Engineering geology*, (2000) n°55, p167-192.- HEIMLICH C. - MASSON F. BOY J.-P. **Surchages océaniques dans les signaux GPS : la quête de l'extrêmement petit.** 2014. p27-32
- GINS Training 2013. **Le Logiciel GINS.** Présentation sous diapositives réalisée par le CNES, le GRGRS et l'Observatoire Midi-Pyrénées du 4 au 7 juin 2013 à Toulouse.
- KOUBA J. **A guide to using international GNSS Service (IGS) products.** 2009. p1-34
- LEANDRO R.-F. **Precise point positioning with GPS, a new approach for positioning, atmospheric studies and signal analysis.** 2009. p1-35
- LEANDRO R.F. - SANTOS M.C. - LANGLEY R.B. **Analyzing GNSS data in precise point positioning software.** 2011. p1-12
- LE MIGNON G. **Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).** Thèse de Doctorat, 2004. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p1-5 - (http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/LeMignon-2004_PhDThesis.pdf)

- LISSAK C., MAQUAIRE O., MALET J.-P. **Role of hydrological process in landslide occurrence: Villerville-Cricqueboeuf landslides (Normandy coast, France)**. 2009. In: Malet, J.-P., Rémaître, A., Bogaard, T.A. (Eds.): Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling, Strasbourg, CERG Editions, pp. 175-180. - (http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Landslide_Processes_Conference/Lissak_et_al.pdf)
- LOYER S. - PEROSANZ F. - MERCIER F. - CAPDEVILLE H. - LEMOINE J.-M. - MEZERETTE A. - SCHAEFFER P. - SOUDARIN L. **Contribution des Centres d'Analyses CNES/ CLS IDS et IGS à l'ITRF2013** . 2014 Présentation sous diapositives
- LOYER S. - PEROSANZ F. - MERCIER F. - CAPDEVILLE H. - MARTY J.-C. **Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center** . 2012.p1-13 Présentation sous diapositives
- MALET et al. **Contribution of GPS to continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France)**. 2000. Comptes Rendus de l'Academie de Sciences - Serie IIa: Sciences de la Terre et des Planètes, n°331(3), p175-182.
- MALET et al. **The use of GPS for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France)**. 2002. Geomorphology, n°43, p33-54.
- MARCHAL J. **Etude d'un glissement de terrain , Travaux confortatif, constatations**. Laboratoire régional de Lyon. (<http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/revues/blpc/BLPC%2051%20pp%20113-130%20Marchal.pdf>) [2014].
- MARTY J.-C. - PEROSANZ F. - MERCIER F. - BRACHER G. - LEGRESY B. - PORTIER L. - CAPDEVILLE H. - LOYER S. - FUND F. - LEMOINE J.-M. - BIANCALE R. **GINS : The CNES/GRGS GNSS Scientific Software**. 2012 http://hpiers.obspm.fr/combinaison/documentation/articles/GINS_Marty.pdf [2014]
- MERCIER F. - BERTHIAS J.-P. - LAURICHESSE D. **Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination**. 2009. p1-29
- MORA et al. **Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements : application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy)**. 2003. Engineering geology, n°68, p103-121.
- OSWALD D. **Analyse de l'activité de glissements de terrain et relation avec les conditions climatiques : Exemples dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse)**. 2003. Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg (Suisse) pour l'obtention du grade de Doctor rerum naturalium. p6-147. - (<http://ethesis.unifr.ch/theses/downloads.php?file=OswaldD.pdf>)
- PEROSANZ F. - FUND F. - LOYER S. - MERCIER F. **GNSS Precise Point Positioning (PPP) including the fixing of phase ambiguities** (ETH Zurich 2012) Présentation sous diapositives
- PEROSANZ F. - LOYER S. - MERCIER F. **Le i-PPP : une alternative au positionnement différentiel**. (Rennes 13-15 novembre 2013) Présentation sous diapositives
- REQUILLART, J.-P. et MOULIN C. 2004 **Glissement du Mas sur la commune d'Avignonet (Grance). Etat de la gestion du risque en Octobre**. p1-4.

Sites internet :

- <http://omiv2.u-strasbg.fr/structure.php>
- <http://omiv.osug.fr>
- http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_articles.php?id_DTart=60&id_DT=7&PHPSESSID=6ee8fdf4f167253b8d6e95f346a82c74
- http://omiv2.unistra.fr/monitored_villerville.php
- http://omiv2.unistra.fr/villerville_instruments.php
- <http://www.universalis.fr/encyclopedie/glissements-de-terrain/3-1-exemple-du-glissement-de-la-clapiere/>
- http://www.geosoc.fr/adherent/s-inscrire/cat_view/1-dossiers/18-amenagement/53-mouvements-de-terrain.html
- <http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/revues/blpc/BLPC%20150-151%20pp%2039-54%20Follacci.pdf>
- http://omiv2.u-strasbg.fr/monitored_supersauze.php
- http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/Spickermann_et_al_2009_IWL.pdf
- http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_articles.php?id_DTart=67&id_DT=7&PHPSESSID=09dc0cde91c1be61f19193e5c8bf6de0
- <http://omiv.osug.fr/observations/omiv/MAS/index.html>
- http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_articles.php?id_DTart=67&id_DT=7&PHPSESSID=09dc0cde91c1be61f19193e5c8bf6de0
- http://www.risknat.org/projets/riskydrogeo/docs/guide_pratique/Acivite1_Ateliers/Presentations%20Atelier2/A2P12-Avignonet-RTM38.pdf
- <http://www.geologie.ens.fr/~vigny/tecto-e.html>
- <http://www.universalis.fr/encyclopedie/marees/4-les-marees-oceaniques-et-leur-prediction-par-la-methode-harmonique/>
- eost.u-strasbg.fr/omiv/publications/Deprez_2010_MsCThesis-EOST.pdf
- memoireonline.com/09/10/3867/m_Etude-dun-glissement-de-terrain-par-differentes-methodes0.html :
- gm-univ-montp2.fr/spip.php?article1658&lang=fr
- <http://www.insa-strasbourg.fr/fr/cursus-ingenieur-en-topographie-3-2-4/>
- http://igsac-cnes.cls.fr/documents/gins/Generalites/fonctionnalites_gins.pdf
- <http://w3.dtp.obs-mip.fr/recherche/equipes/geodsat/geodsat.htm>
- grgs.obs-mip.fr/en/content/download/310/2372/file/applications.pdf

