

Projet recherche
Forcalquier
ENSG – Groupe SB1

29 juillet 2016

Cadence d'acquisition rapide GNSS



Réalisé par :
Gabriel CALASSOU
Augustin GAGNON
Bruce THOMAS
Amaury ZARZELLI

Encadré par :
Serge BOTTON



ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES

Nous tenons à remercier particulièrement notre professeur encadrant Serge BOTTON de nous avoir guidés et soutenus tout au long du projet ainsi que Camille FAVRE, élève-ingénieur PPMD à l'IFFSTAR dont le sujet de stage a inspiré le projet.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des professeurs de l'ENSG qui au travers de chaque stage nous ont fait progresser et qui ont su pendant le projet nous apporter des conseils essentiels à la réalisation de notre projet.

Enfin, nous remercions Christian LEPAGE pour son aide et ses conseils, prodigués sur les aspects techniques du projet.



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

Sommaire

Introduction.....	3
Objectifs du projet.....	4
Objectif 1 : vérification du fonctionnement idéal de la cadence d'acquisition à 20 Hz des <i>SP80</i>	4
Objectif 2 : application du 20 Hz sur l'observation des oscillations d'un pont suspendu.....	4
Objectif 3 : application du 20 Hz sur une voiture.....	4
Objectif 4 : essayer les traitements en temps réel avec les GNSS	4
Contexte et matériel pour les mesures	5
I. Cadence d'acquisition à 20 Hz.....	6
1. Mesures sous différentes cadences d'acquisition.....	6
a. Contexte et Mesures	6
b. Traitement.....	6
c. Résultats	7
2. Vérification précise du 20 Hz.....	7
a. Contexte	7
b. Mesures.....	8
c. Traitement et Résultats.....	9
3. Création d'un script Python.....	10
II. Les applications du 20 Hz	11
1. Etude des oscillations d'un pont suspendu.....	12
a. Contexte	12
b. Mesures.....	12
c. Traitement.....	13
d. Résultats	13
e. Bilan	15
2. Etude de l'état des routes	15
a. Contexte et Mesures	15
b. Traitement et Résultats.....	16
3. Etude des oscillations de la caisse d'un véhicule	22
III. Le temps réel avec les <i>Spectra SP80</i>	23
Conclusion	24

Introduction

Les sept premières semaines de stage ont permis une utilisation variée des récepteurs GNSS. Que ce soit lors des deux stages de géodésie, du stage de stéréopréparation, de topométrie ou de photogrammétrie, les GNSS avaient leur utilité propre chaque semaine. Cependant, toutes les mesures ont été prises à une cadence d'acquisition de quinze secondes en mode statique.

Pourquoi alors ne pas utiliser les récepteurs GNSS dans des phases de mouvement et à une cadence d'acquisition plus rapide ? Les nouveaux récepteurs GNSS (Spectra Precision *SP80*) peuvent aller jusqu'à 20Hz soit 20 mesures par seconde.

Ces phases de mouvement étudiées s'appliquent tant à des mouvements importants, tels qu'un homme qui marche ou une voiture qui roule, qu'à des oscillations plus faibles comme celles d'un pont suspendu ou d'ouvrages d'arts sensibles. La cadence d'acquisition à 20Hz ouvre alors à de nombreuses perspectives pour des applications nouvelles. Cette étude est en lien avec le stage de Camille FAVRE, élève-ingénieur PPMD à l'IFFSTAR, qui travaille notamment sur les oscillations d'une poutre reproduisant les mouvements d'un pont suspendu.

Tout d'abord, il est intéressant de vérifier en statique la cadence d'acquisition à 20Hz puis de tester les *SP80* en post traitement sur différents cas (à pied, en voiture, sur un pont...).



Objectifs du projet

Notre projet de fin de stage à Forcalquier est orienté vers la recherche. Ainsi, sur la base de l'intitulé du sujet initial, puis des résultats que nous obtenons au fur et à mesure, il est intéressant de se fixer des objectifs tout au long de l'étude. Voici la liste des objectifs que nous nous sommes fixés dans l'ordre.

Objectif 1 : vérification du fonctionnement idéal de la cadence d'acquisition à 20 Hz des *SP80*

Il s'agit tout d'abord de vérifier que les *Spectra SP80* possèdent bien une cadence d'acquisition de 20 Hz et qu'elle n'est pas interpolée à partir d'une cadence inférieure. Cette possible interpolation peut s'observer s'il existe une dérive entre un même trajet effectué à 1 Hz et celui fait à 20 Hz.

Nous présenterons alors le cas d'une marche dans un virage serré ainsi que les GNSS posés sur une voiture prenant un virage. Ces calculs se feront sur la base du post-traitement.

Cet objectif s'accompagne également d'une volonté de faciliter la lecture des courbes obtenues en créant un code Python remplaçant RTK plot et plus facile à manier.

Objectif 2 : application du 20 Hz sur l'observation des oscillations d'un pont suspendu

Grâce à la cadence d'acquisition à 20 Hz, il est possible de stationner un GNSS sur un pont suspendu pour observer ses oscillations dues au vent ou au trafic. Il est alors intéressant d'étudier la transformation de Fourier du cheminement pour déterminer la fréquence propre du pont et examiner l'impact du passage de poids lourds ou de rafales de vent sur le pont.

Objectif 3 : application du 20 Hz sur une voiture

L'installation de GNSS sur une voiture permet d'étudier les oscillations de la caisse ainsi que l'état des routes. Il est alors possible de quantifier la déformation de certaines routes uniquement par observation GNSS.

Objectif 4 : essayer les traitements en temps réel avec les GNSS

Lors de la prise de mesures, le post-traitement ne permet pas d'apporter toutes les informations récupérées au fur et à mesure de l'expérience. Le temps réel quant à lui, permet à la fois de traiter les données à la fin mais aussi d'étudier les points mesurés directement pour renvoyer leurs coordonnées. Mais le temps réel demande une configuration spéciale sur les GNSS, il sera alors intéressant de créer une notice d'utilisation du temps réel sur les *SP80*.

Contexte et matériel pour les mesures

Tout au long du projet, nous avons utilisés le matériel de base pour les stages de géodésie :

- Les 6 récepteurs GNSS Spectra Precision *SP80* avec contrôleurs (0611, 0398, 0395, 0386, 0349, 0336)
- Clous IGN et masse pour modéliser les points
- Trépieds avec les en-bases propres au GNSS

Ce projet étant un projet de recherche, il s'agissait d'effectuer différentes expériences pour tester l'étude du GNSS à 20Hz.

Les 11 et 12 juillet 2016, nous avons effectué les premiers tests pour vérifier la cadence d'acquisition à 20 Hz du GNSS. Nous avons travaillé sur la zone des piliers à l'arrière du centre IGN de Forcalquier. Des piquets ont été utiles pour définir le trajet à parcourir à pied avec les GNSS.

Le 13 juillet 2016, nous avons défini avec des craies, sur le parking du collège de Forcalquier, un parcours en ligne droite suivie d'un virage serré afin d'étudier une dérive possible du 20 Hz.

Les 18 et 25 juillet, nous avons travaillé sur deux ponts pour étudier d'éventuelles oscillations visibles par les GNSS. Le premier pont est celui du Viaduc des Latins à la sortie de Forcalquier vers Mane. Le second correspond au pont suspendu de Manosque qui traverse la Durance.

Les 19 et 20 juillet, une Twingo et une Kangoo sont équipées tour à tour de quatre GNSS positionnés sur le toit afin d'étudier les oscillations de la caisse. Nous avons parcouru en aller-retour le trajet centre IGN de Forcalquier / parking des Mourres.

Le 22 juillet, une Twingo équipée d'un *SP80* parcourt deux départementales (D4100 et D950) afin d'étudier l'état des chaussées.



I. Cadence d'acquisition à 20 Hz

Le tout premier objectif de ce projet de recherche est d'évaluer la possibilité de travailler sur une cadence d'acquisition à 20Hz sur les *Spectra SP80*. Ce travail se décompose en deux parties :



- vérifier si les GNSS peuvent bien prendre 20 mesures par seconde ;
- analyser s'il s'agit d'une véritable cadence à 20Hz et non d'une cadence à 20Hz interpolée.

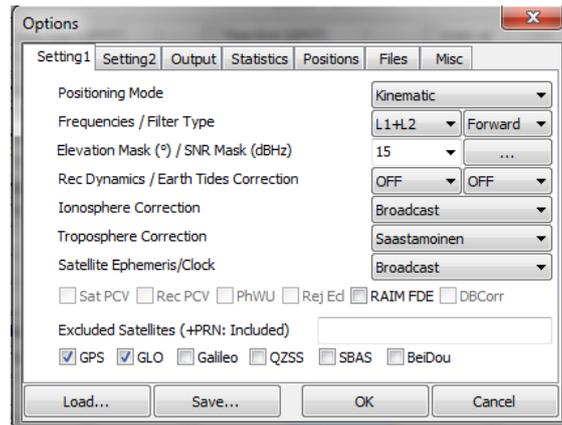
1. Mesures sous différentes cadences d'acquisition

a. Contexte et Mesures

Tout d'abord, il s'agit de tester les GNSS à différentes cadences d'acquisition sur un trajet défini par une forme géométrique simple. Le GNSS de base est installé sur le pilier 5, situé à l'arrière du centre IGN de Forcalquier, et est configuré sur 20Hz en post-traitement. Les coordonnées du pilier sont connues et serviront pour le traitement sur *RTKPOST*. Avec le GNSS mobile configuré successivement à 1Hz, 5Hz, 10Hz et 20Hz, on stationne une minute sur le point de départ du trajet afin d'établir correctement la liaison entre les satellites et le récepteur. Puis on parcourt la trajectoire définie avec une marche lente pour récupérer le maximum de points et pouvoir ainsi comparer les résultats des quatre cadences.

b. Traitement

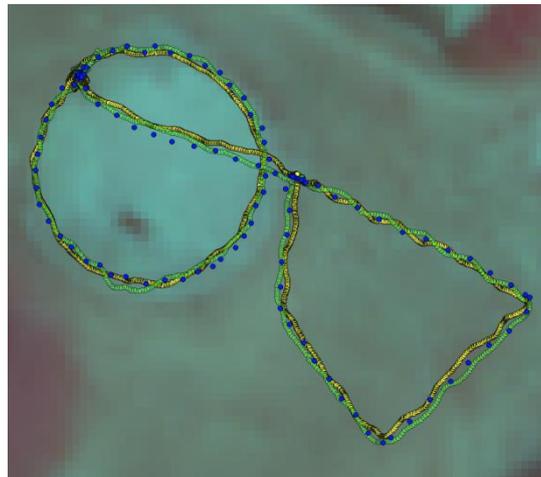
Plusieurs essais sur le terrain ont été nécessaires pour accéder à des résultats utiles. Ainsi les fichiers d'observations, les plus significatifs, de la base et des quatre mobiles sont enregistrés dans le dossier *12-07-2016 / 2^e essai (1 min attente)*. Le traitement sur RTK post nécessite une configuration précise des options. Ainsi, il faut mettre en mode cinématique pour étudier le déplacement du GNSS et choisir si on assemble ou non les fréquences L1 et L2. Or ici nous sommes dans un cas où les lignes de base sont courtes (nous sommes proches de la base), ainsi la fréquence L2 peut apporter un certain bruit aux mesures. Il est alors un peu plus intéressant de ne considérer que la fréquence L1. Dans le cas des lignes de base longues, la fréquence L2 permet d'apporter une meilleure précision en corrigeant les erreurs dues à la troposphère. Enfin, les résultats varient légèrement si on prend en compte ou non les satellites GLONASS.



Capture d'écran de la fenêtre des options sur RTKPOST

c. Résultats

Ci-dessous, voici la superposition sur QGIS des trajets parcourus au centre IGN à différentes cadences d'acquisition. En bleu, le parcours est effectué en 1 Hz, puis en vert on passe à 10 Hz et enfin en jaune, le chemin est parcouru en 20 Hz. On observe ainsi l'augmentation du nombre de points mesurés, on peut même compter 20 points jaunes à 20 Hz entre deux points bleus à 1 Hz.



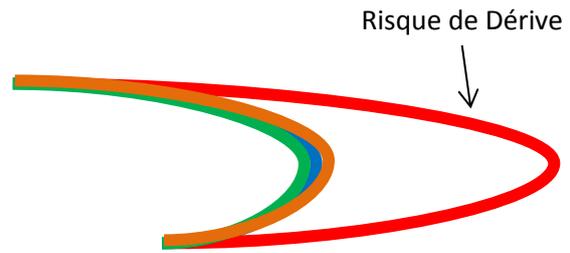
Visualisation sous QGIS de 3 trajets identiques à cadences d'acquisitions différentes

2. Vérification précise du 20 Hz

a. Contexte

Il s'agit dorénavant de vérifier si la cadence d'acquisition à 20 Hz n'est pas interpolée à partir d'une cadence inférieure. Pour cela, il est intéressant de définir un trajet possédant un virage très serré. Le but est de parcourir ce trajet de plus en plus rapidement pour observer s'il y a une dérive au niveau du virage. En effet, si la cadence est interpolée à 1 Hz, il y aura au départ moins de points pour

constituer le virage. De plus, vu que nous prenons de la vitesse pendant le demi-tour, peu de points seront mesurés. Ainsi, l'interpolation va essayer de retrouver une courbe qui passe par tous les points. On observera alors probablement une dérive de la courbe : les trajets, pourtant identiques, ne se superposeront pas.



b. Mesures

Nous avons choisi un terrain dégagé avec peu de masques, avec un sol lisse afin de pouvoir marcher voire courir facilement. Le parking supérieur du collège correspond à cette description : nous avons pu également tracer le chemin à parcourir en identifiant des points sur lesquels passer. La base est positionnée un peu plus haut par rapport à la trajectoire dessinée au sol. Ses coordonnées ont été déterminées après l'avoir stationné pendant 45 minutes à 1 Hz. Ensuite, il a été possible de déterminer les coordonnées des points de la trajectoire avec l'option *Stop&Go* du GNSS configuré à 1 Hz. Enfin, pour la prise de mesures, les deux GNSS sont configurés en 20 Hz. Le chemin est parcouru une dizaine de fois à des vitesses différentes (parcours effectué entre 5 s et 20 s) et par deux personnes différentes.

Outre les mesures sur le parking, nous avons par la suite posé des GNSS sur un véhicule et nous avons pu observer le trajet parcouru. A plusieurs reprises, le véhicule est passé dans certains virages du massif des Mourres à une vitesse de 30 km/h.



c. Traitement et Résultats

La représentation des trajectoires, faites à pied, aux différentes vitesses ne présente aucune dérive : les courbes se superposent quasiment, à 30 cm près ce qui correspond à l'écart possible de notre marche par rapport au chemin. Ci-dessous, trois parcours à vitesse différente (du jaune le plus lent au rouge le plus rapide) : on observe une quantité de points mesurés plus importante lors de la marche lente. La courbe en rouge possède des points de mesures plus espacés, notamment à la fin du trajet qui correspond à l'accélération suite au virage.



Visualisation sous QGIS de 3 trajets identiques à vitesse différente

Le parcours dans les Mourres permet d'identifier les mesures prises dans les virages et de constater l'absence de dérive lors de la superposition du tracé GNSS sur un fond de carte.



Visualisation sous QGIS du trajet aller du massif des Mourres avec un GNSS

Finalement, que ce soit à pied ou en voiture, quelque-soit la vitesse prise par le GNSS, il n'y a pas de dérive du tracé GNSS par rapport au chemin parcouru. Ainsi, nous pouvons conclure que la cadence d'acquisition est bien à 20 Hz et qu'elle n'est pas interpolée à partir d'une cadence plus faible.

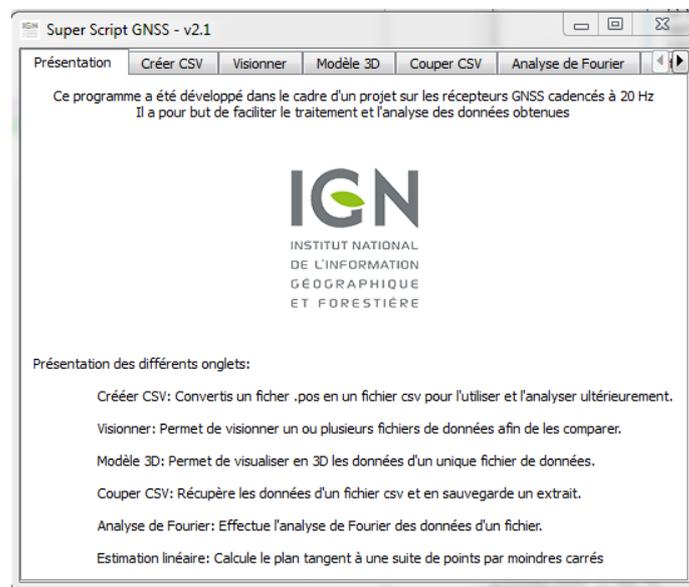
3. Création d'un script Python

Nous avons mis en place un programme python pour récupérer les coordonnées du fichier pos et effectuer différents calculs dessus. En effet, l'utilisation de RTKPlot ne permet pas toutes les manipulations voulues sur les graphiques.

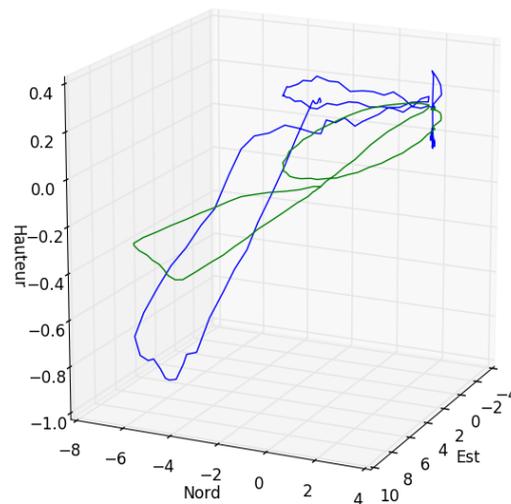
Pour cela, le programme propose d'abord de convertir le fichier pos en un fichier csv. Ce fichier peut ensuite être affiché, avec quelques options graphiques et un outil de zoom plus ergonomique que RTKPlot. Il peut aussi être comparé à d'autres fichiers de données dans une même fenêtre d'affichage.

Afin de faciliter l'analyse des données obtenues après traitement par RTKLIB, d'autres outils ont été rajoutés selon l'évolution des besoins : une fenêtre de visualisation en 3 dimensions, un outil permettant d'extraire une partie d'un fichier, un outil pour effectuer l'analyse de Fourier des points et un autre pour calculer un plan moyen aux points du fichier, par estimation linéaire.

Voici ci-dessous une capture d'écran de l'affichage du programme Python avec les onglets pour traiter et analyser les données.



Si par la suite, le script Python ainsi que son intérêt dans notre cas sont expliqués dans le cadre des applications, voici une première visualisation en 3D obtenue grâce au programme. Le graphique suivant correspond à la première expérience réalisée : la marche à différentes cadences autour du pilier 5 au centre IGN de Forcalquier. En bleu, on observe le chemin parcouru alors que la courbe verte représente la projection du trajet sur un plan moyen.



II. Les applications du 20 Hz

Sachant désormais que les *Spectra SP80* possèdent bien une véritable cadence d'acquisition à 20 Hz, il est intéressant d'étudier différentes applications qui en découlent. Ainsi, nous étudierons grâce aux GNSS configurés en 20 Hz, les oscillations d'un pont suspendu et l'état du goudron des routes.



1. Etude des oscillations d'un pont suspendu

Si les *Spectra SP80* peuvent prendre des mesures de l'ordre de 20 points par seconde, il est alors possible d'étudier des mouvements de faibles amplitudes avec une bonne précision. Le cas du pont suspendu qui peut osciller faiblement grâce aux câbles flexibles reliant le tablier aux berges est alors intéressant à étudier par GNSS. Les oscillations du pont sont principalement dues au vent et au trafic (passage continu de voitures ou de poids lourds).

Avant l'étude du pont suspendu de Manosque, nous avons testé cette idée sur le Viaduc des Latins à la sortie de Forcalquier dans la direction de Mane. Les résultats obtenus dans le premier cas nous permettent d'observer une certaine corrélation entre les passages de poids lourds et les oscillations plus importantes du pont. Cependant, le Viaduc des Latins possède un tablier rigide en pierre et il paraît difficile d'estimer une fréquence propre de ce type de pont, sauf en stationnant au moins 24h (oscillations dues au cycle jour/nuit).

a. Contexte

Le pont suspendu de Manosque construit en 1939 franchit la Durance dans le sens Nord-Ouest / Sud-Est. Il mesure 205 m de longueur pour 6 m de large. La station GNSS de base est positionnée en dehors du pont, pour ne pas ressentir les vibrations. Le point est matérialisé par un clou IGN sur le parking avant le pont à la sortie de Manosque. La station GNSS mobile est quant à elle positionnée sur le trottoir, côté droit vers Valensole, au centre du pont. Une distance de 150 m sépare les deux stations. Chaque *SP80* est configuré en cadence d'acquisition à 20 Hz et l'étude se fait en post traitement.



Pont suspendu de Manosque

b. Mesures

Deux sessions, les 18 et 25 juillet ont été organisées pour étudier les oscillations du pont. La première séance a duré 20 minutes tandis que la seconde a duré 45 minutes afin de pouvoir analyser sur un temps plus long les oscillations du pont suspendu et ainsi pouvoir déterminer au plus juste la fréquence propre de l'ouvrage. Chaque passage d'un flux continu de véhicules, de poids lourds, de convois exceptionnels et même d'absence totale de véhicules sur le pont est noté à la seconde près afin de lier les observations terrain aux résultats.

c. Traitement

Le traitement des données mobiles nécessite de connaître les coordonnées précises de la base. Ainsi, il faut d'abord traiter le fichier d'observation de la base avec RTK Post. Comme station de référence, nous utilisons la station du RGP de Saint Michel l'Observatoire.

Il est alors possible de traiter les données recueillies en mobile sur le pont suspendu en rentrant dans les options de position de RTK Post, les coordonnées de la base. Pour le calcul des coordonnées du GNSS mobile, le mode de positionnement doit être en cinématique.

d. Résultats

Un pont suspendu possède une fréquence propre, ainsi, grâce à l'observation des oscillations de l'ouvrage, il est possible de déterminer cette fréquence. Il est intéressant de travailler, dans le cadre d'un mouvement périodique, sur la transformation de Fourier. Grâce au programme python réalisé par nos soins, nous avons pu obtenir celle-ci et observer une fréquence propre égale à 0.55 Hz suivant la hauteur, le premier pic du spectre correspondant à la composante continue due à la hauteur ellipsoïdale du pont, et au bruit de très haute fréquence.

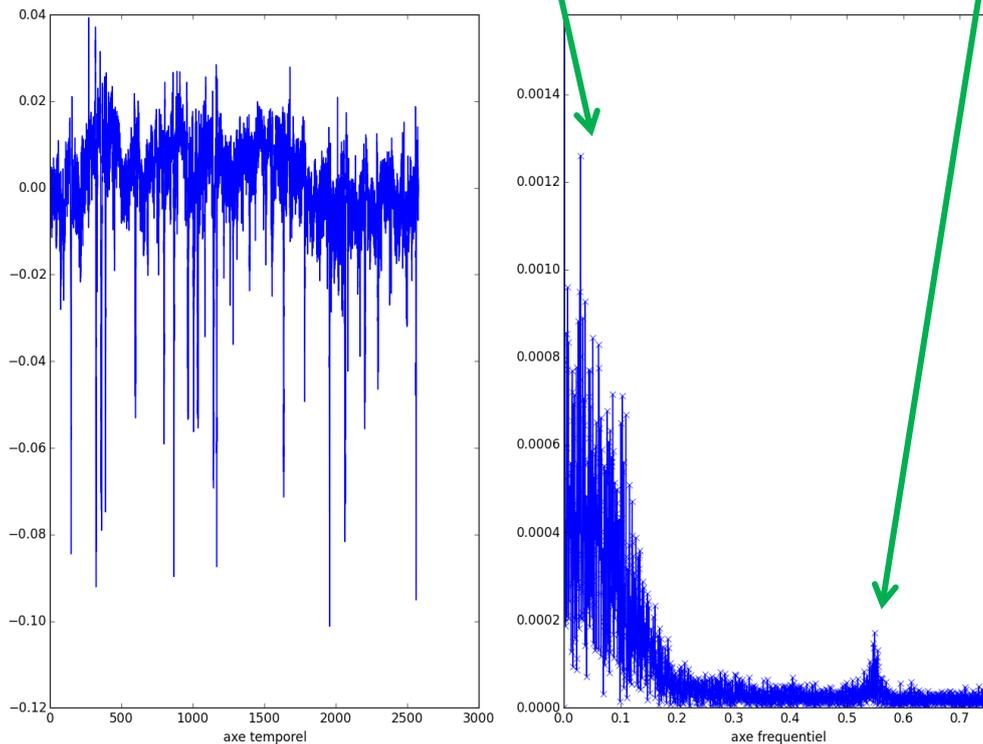


Figure 1 : Transformée de Fourier en hauteur 25-07

Une fréquence de l'ordre de 0,4 Hz est également observable suivant l'axe Est/Ouest. D'après nos observations, elle est due au vent remontant le lit de la Durance. Toutefois la transformée de Fourier selon le nord reste insignifiante à cause de l'orientation du pont sur le plan géographique (orienté NO).

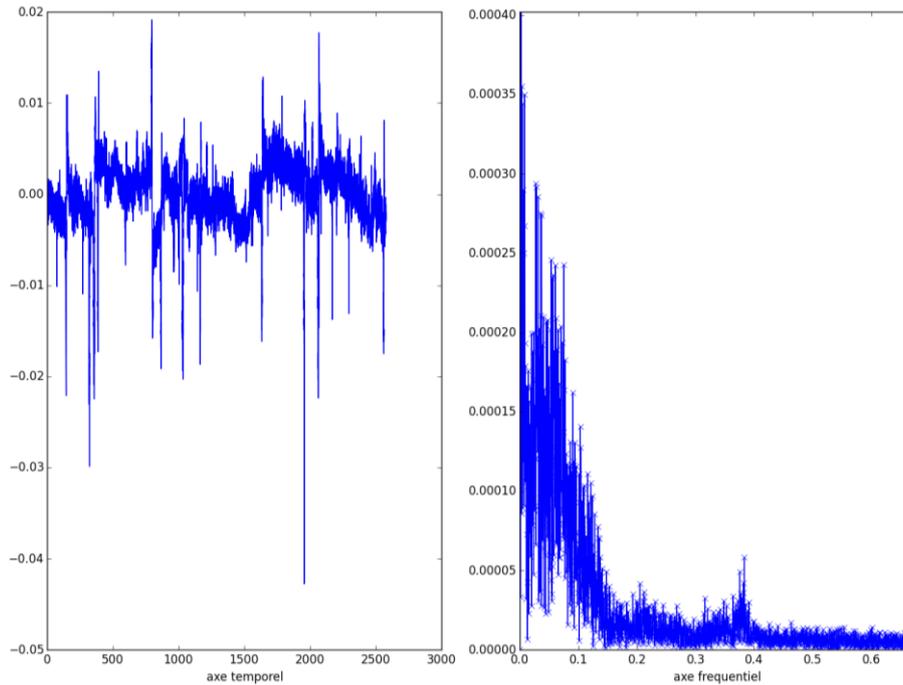


Figure 2 : Transformée de Fourier en Est 25-07

Mis à part les fréquences propres du pont, il est intéressant de constater qu'avec un GNSS à 20Hz, nous sommes capables de percevoir les variations de hauteur du pont due à la circulation. Ces variations sont de l'ordre de 10 cm dans le cas d'un fort afflux de voiture.

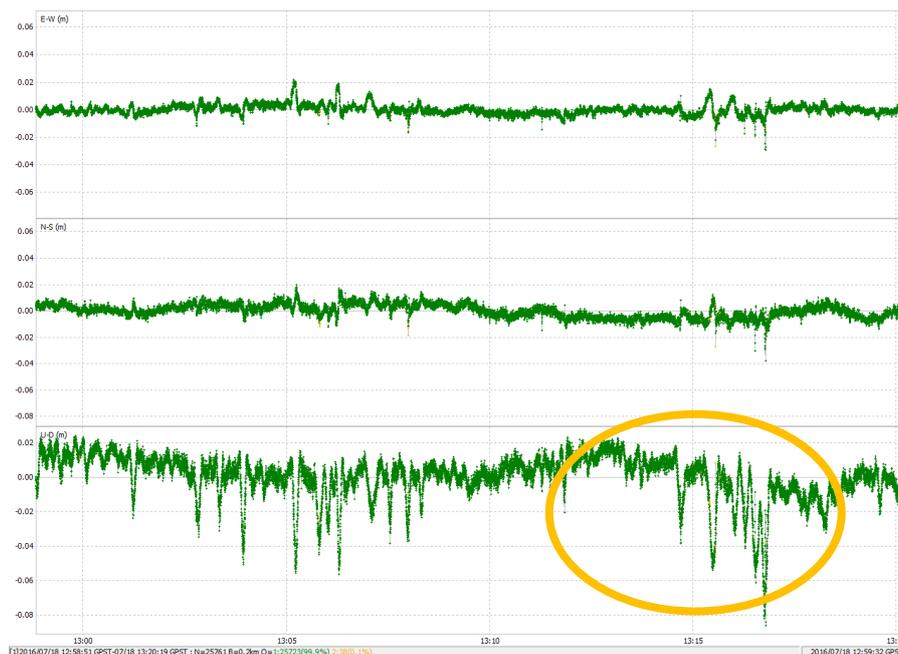


Figure 3 : Variation du pont suspendu de Manosque en E, N et Z le 18-07

On observe particulièrement dans le cercle jaune, de faibles oscillations qui correspondent à un moment où le pont ne subissait que les rafales de vent (aucune circulation pendant une vingtaine de secondes) suivies de très fortes oscillations lors d'un convoi exceptionnel et d'un important flux de véhicules.

e. Bilan

Finalement, d'après le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, l'utilisation de la cadence d'acquisition à 20 Hz sur le pont permet d'observer des phénomènes à 10 Hz maximum, correspondant à certaines vibrations.

2. Etude de l'état des routes

Une seconde application nous est venue à l'idée lorsque nous roulions avec les GNSS dans la voiture. Pourquoi ne pas étudier l'état d'une route grâce aux vibrations d'un véhicule roulant dessus ? Ainsi, un GNSS mobile prenant des mesures à 20 Hz dans une voiture permet d'identifier les mouvements de la voiture selon la route pratiquée. Une route lisse provoque peu d'oscillations de la voiture alors qu'une route au goudron dégradé renvoie un signal possédant de fortes vibrations.

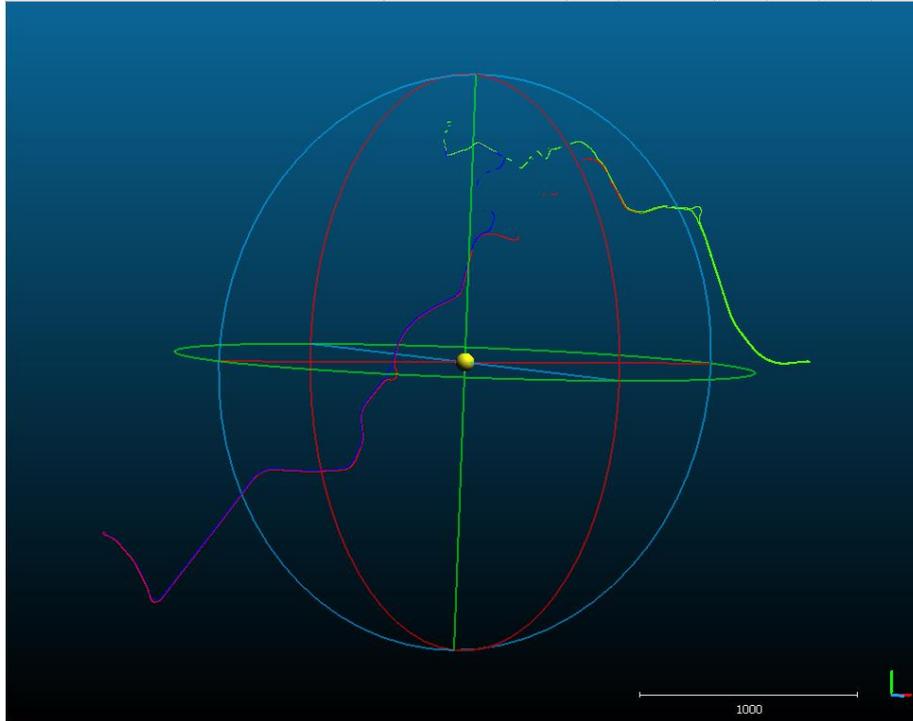
a. Contexte et Mesures

Pour tester cette application, un seul *Spectra SP80* mobile est positionné sur une canne dans une Twingo. La base se situe sur le pilier 5 à l'arrière du centre IGN de Forcalquier. La route en bon état correspond à la portion de la D4100 à la sortie de Forcalquier vers La Brillane : le goudron est neuf et lisse. La chaussée déformée est la portion linéaire de la D950 entre Forcalquier et le barrage de Limans : le goudron a été refait à plusieurs reprises et la route possède des trous. On effectue un aller-retour sur chaque portion. La cadence d'acquisition à 20Hz, à une vitesse de 60km/h, permet d'avoir un point mesuré tous les 0,83 m. Les mesures ont été prises les 22 et 25 juillet afin de pouvoir comparer les résultats obtenus.



b. Traitement et Résultats

Le fichier de mesure du trajet effectué est converti et exploité par le logiciel *CloudCompare*. Celui-ci a pour avantage de permettre une modélisation 3D du parcours effectué et donc de permettre à l'utilisateur d'identifier facilement les portions de routes intéressantes et de les extraire sous un fichier de mesures.



Visualisation sous *CloudCompare* d'un trajet avec un SP80

Pour évaluer la qualité de la route, deux méthodes sont utilisées :

- une estimation linéaire par moindres carrés ;
- une analyse de Fourier de la portion de route étudiée.

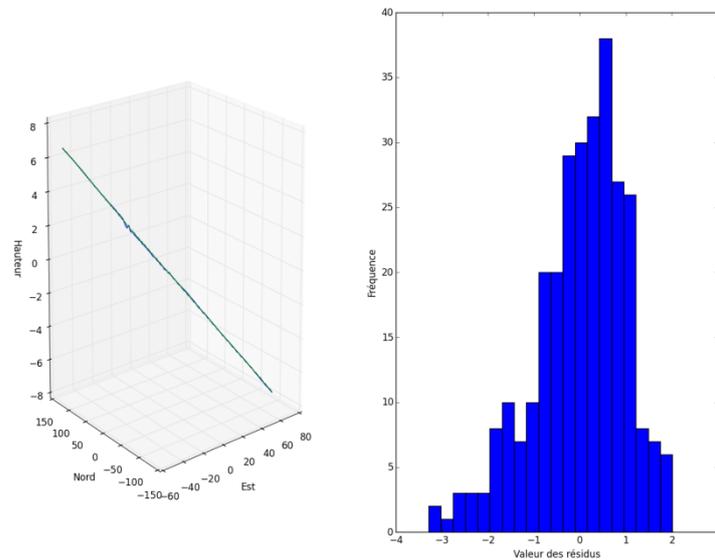
Estimation linéaire par moindres carrés :

Le principe de cette méthode est de tracer la projection du trajet sur un plan moyen d'une portion de route afin de pouvoir mesurer :

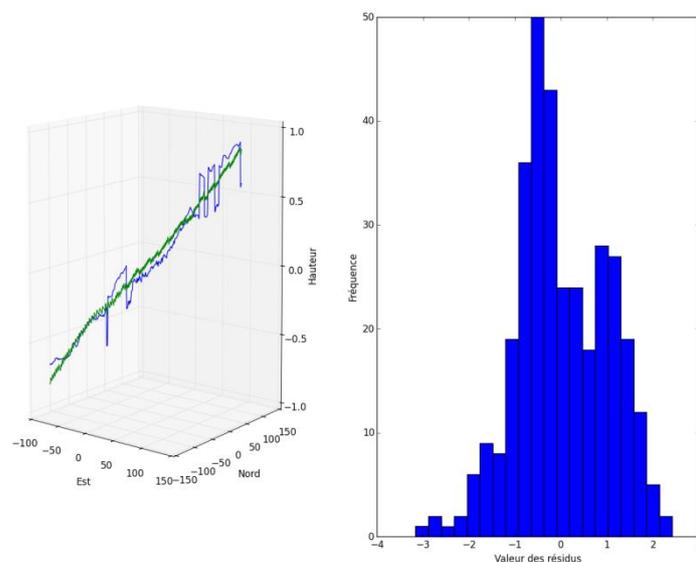
- l'écart type de l'éloignement moyen des mesures au modèle calculé, soit l'écart type des résidus ;
- l'écart crête à crête entre le maximum et le minimum du modèle estimé qui permet de détecter certains événements tel que les dos-d'âne ou les changements de goudrons sur la route.

Ces écarts sont renvoyés directement sur l'affichage prévu par le script Python. De plus, afin de s'assurer de la fiabilité du modèle puis de la qualité de route, il est nécessaire de s'appuyer sur un graphique de répartition des résidus. Voici quelques exemples de résultats obtenus par la méthode des moindres carrés.

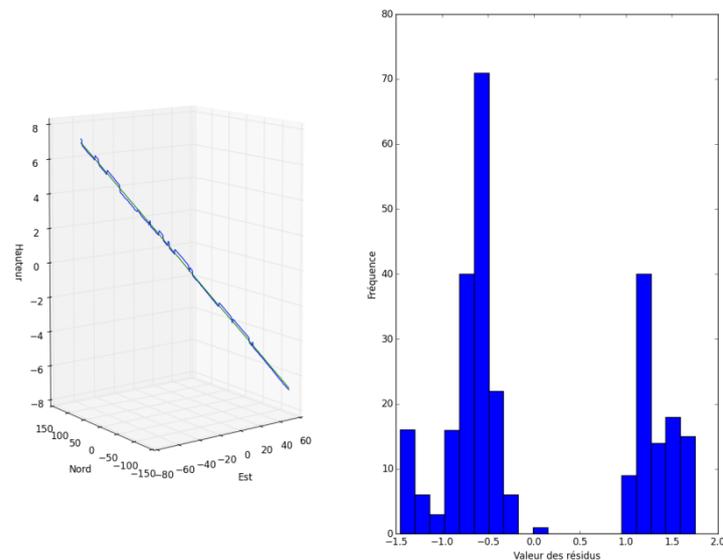
Tout d'abord, ci-dessous une route en bon état avec un goudron lisse. Ainsi le modèle estimé suit quasiment parfaitement la route. Les résidus suivent une gaussienne centrée en 0 ce qui assure la validation du modèle. Quelques résidus dépassent la valeur 4, cela est alors probablement dû au sursaut présent au début du trajet. L'écart-type des mesures est de 1,4 cm de distance au modèle.



Puis, voici une route avec un goudron de très mauvaise qualité. Les mesures prises par le GNSS sont très dispersées par rapport au modèle du plan moyen. Les écarts types forment une gaussienne prouvant que le modèle est juste. L'écart type est alors de 4,3 cm.



Enfin, un second test sur la route en bon état renvoie des résultats surprenants. En effet, on observe plusieurs sursauts qui n'étaient pas présents lors du premier essai. Ainsi, le modèle n'arrive pas à s'adapter et nous obtenons un graphique de la répartition des résidus qui n'est pas une gaussienne. Ce résultat est peut-être dû à la vitesse du véhicule. En effet, la première fois la vitesse n'a pas dépassé les 60 km/h tandis que pendant le second tour, la voiture a roulé à 80 km/h. Cela peut aussi être dû à des mouvements du récepteur GNSS. Ces écarts-types sont représentés en deux fois puisque la droite moyenne s'est insérée au milieu de la droite du bas des créneaux et celle du haut des créneaux.

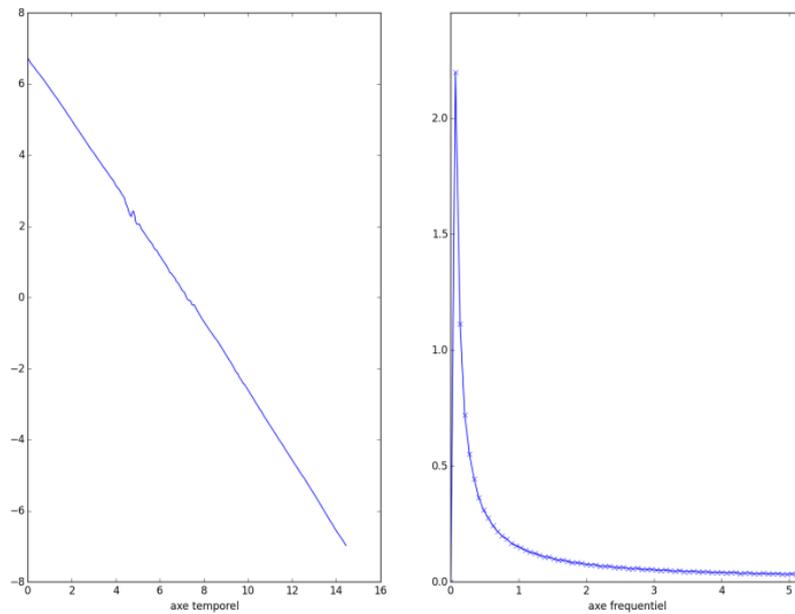


Ainsi, cette méthode d'estimation ne fonctionne que lorsque la portion de route suit à peu près un plan de pente constante.

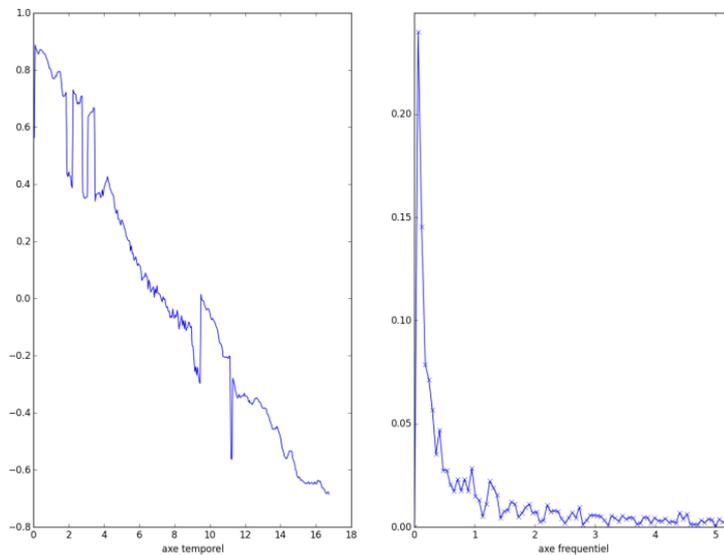
Analyse de Fourier :

Cette méthode nous permet d'obtenir le spectre de Fourier de la portion de route étudiée. À l'aide de ce spectre, l'on peut déceler des fréquences hautes, supérieures au hertz, liées aux vibrations rapides de la voiture, induites par la mauvaise qualité d'une route. On obtiendra une première fréquence, basse, due à la durée de la mesure et à la variation en hauteur ellipsoïdale. Cette méthode est plus robuste, étant donné qu'elle est applicable à des trajets de pente non constante.

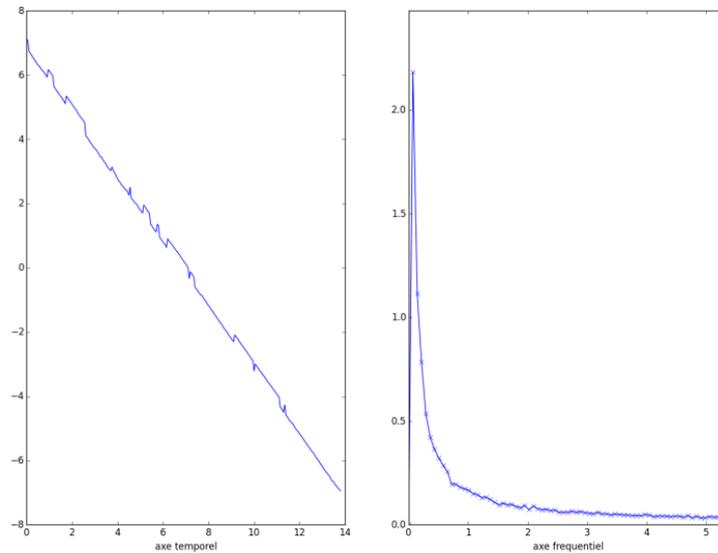
Ainsi le premier cas de la chaussée en bon état, renvoie une analyse de Fourier en accord avec les écarts types : le spectre ne présente pas de fréquence haute.



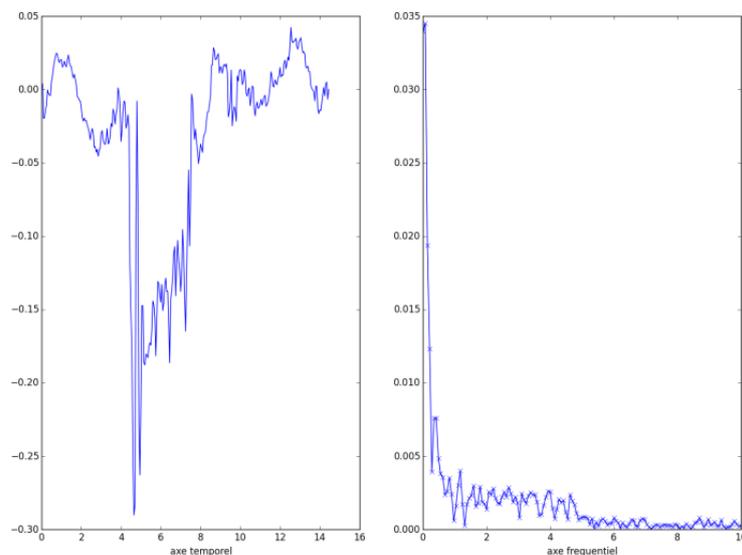
Le cas de la route déformée donne un spectre très bruité, ce qui correspond à l'état de la route : beaucoup de vibrations sur la voiture.



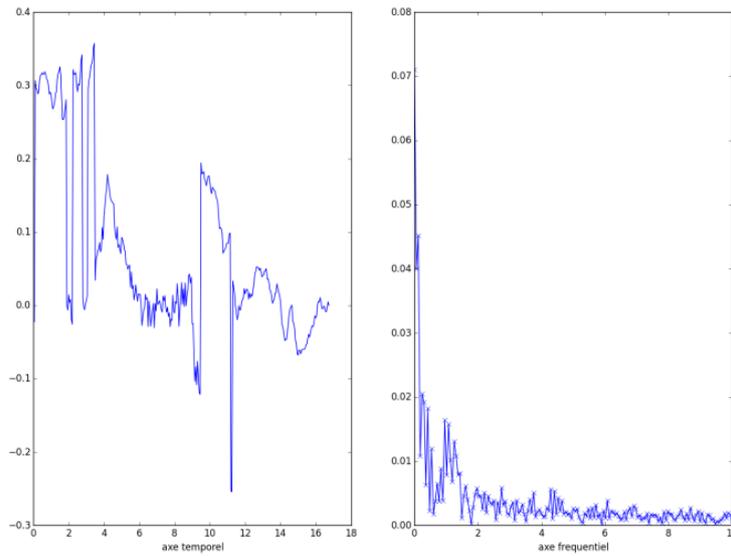
Enfin, on observe que sur le second passage sur la route lisse, à vitesse plus importante, qu'il existe de nombreux sursauts mais qui n'impactent pas le spectre de Fourier (alors qu'ils avaient posé problème lors du calcul de régression linéaire). Ce-dernier ne présente pas de haute fréquence non plus.



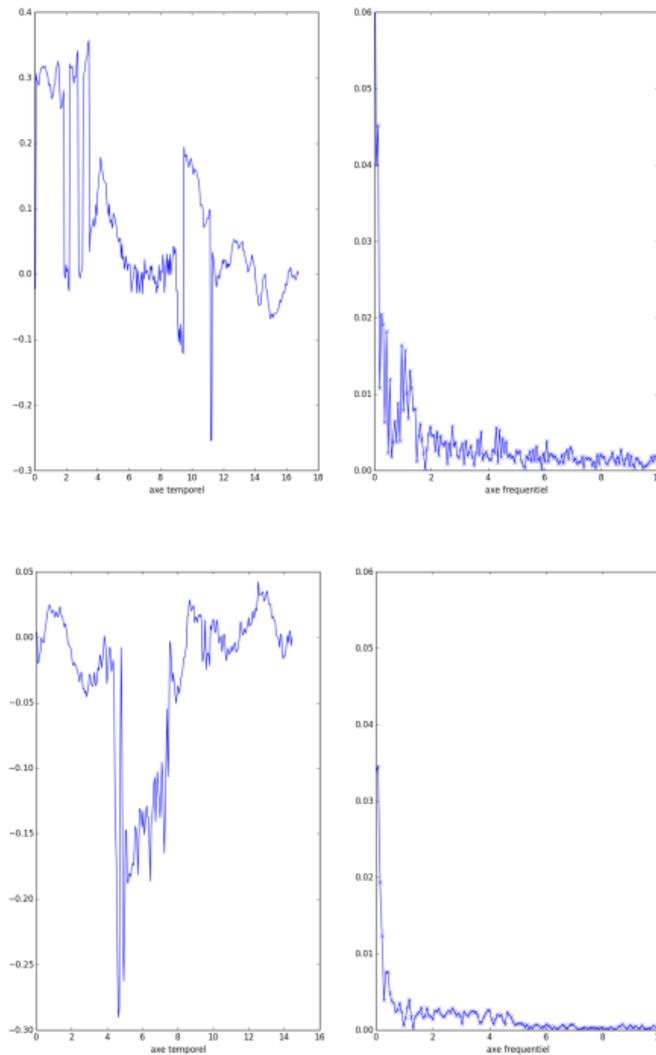
Afin de s'acquitter de la première basse fréquence, due à la durée d'acquisition, on peut réaliser une rotation des points selon la pente, afin de les ramener à une hauteur ellipsoïdale nulle en moyenne : on rend le plan moyen horizontal. Cela permet de mieux constater le relief sur la série temporelle, et les fréquences sur le spectre de Fourier. Ci-après, voici les résultats obtenus pour la première portion étudiée dans ce paragraphe, avec une chaussée en bon état :



Et pour la deuxième portion, chaussée déformée :



Et enfin, la comparaison des deux, en utilisant la même échelle d'amplitudes pour le spectre de Fourier :



c. Bilan

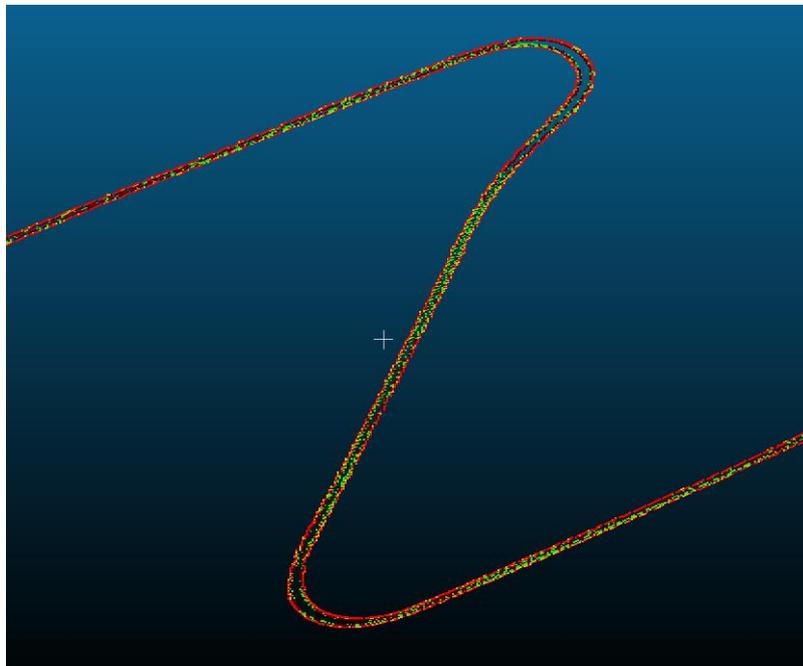
Finalement, l'utilisation de la cadence d'acquisition à 20 Hz en voiture à une vitesse maximale de 60 km/h permet de mesurer un point tous les 0,83 m (soit en-dessous du mètre). Il est ainsi possible d'étudier au mètre près l'état de la route par simple passage de GNSS dessus.

3. Etude des oscillations de la caisse d'un véhicule

La présence d'un GNSS sur un véhicule nous a d'abord permis d'étudier l'état d'une route. Il est également intéressant d'étudier les oscillations de la caisse en positionnant quatre récepteurs GNSS sur un véhicule. Pour faire cela, Christian Lepage nous a préparé des aimants sur lesquels nous pouvons visser les *SP80*. Ces aimants peuvent être fixés sur les barres de toit du véhicule, en l'occurrence une Kangoo.

Nous avons pu parcourir avec cette solide installation le trajet qui mène du centre IGN au massif des Mourres en aller-retour. Le passage dans la ville de Forcalquier a permis d'étudier la réaction des *SP80* face aux dos d'ânes. La vitesse n'a pas dépassé les 50 km/h.

Si nous avons pu récupérer les trajectoires des quatre GNSS, il est cependant difficile d'exploiter ces mesures. En effet, il serait intéressant de faire passer un plan à travers les quatre mesures GNSS prises en 20 Hz et d'étudier l'avancée de ce plan sur le trajet. Nous aurions alors eu une modélisation des vibrations de la caisse. Nous avons préféré nous concentrer sur l'étude de l'état des routes afin d'avoir une application précise de la cadence d'acquisition à 20 Hz.

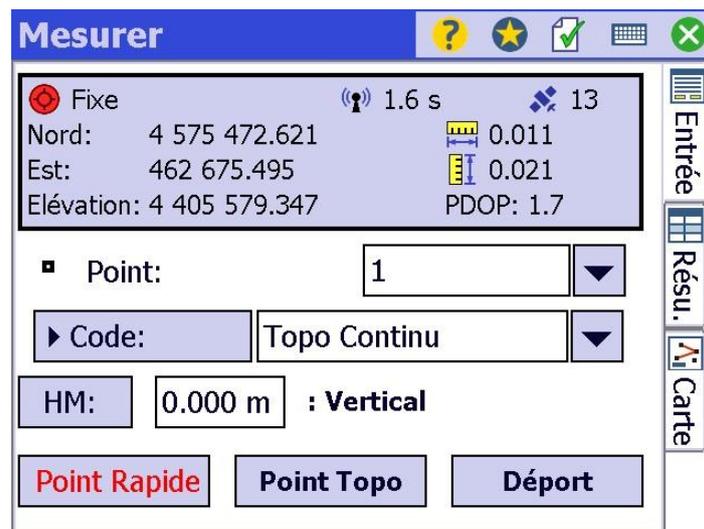


Visualisation du modèle 3D du trajet parcouru avec 4 GNSS sur le toit de la Kangoo

III. Le temps réel avec les *Spectra SP80*

Si le post-traitement permet d'étudier toutes les données à la fin de la prise de mesures, il est également intéressant de travailler en temps réel. En plus des avantages équivalents au post-traitement, le temps réel contient la possibilité d'accéder directement, pendant les expériences, aux coordonnées des points mesurés. Cette application trouve alors toute son utilité dans des cas de mouvements de terrains (sismique ou volcanique) afin de surveiller en temps réel les mouvements de la croûte terrestre.

Dans le cadre de notre projet, l'observation en temps réel est un complément afin d'aller plus loin dans l'étude des *Spectra SP80*. Dans un premier temps, il est nécessaire de configurer les GNSS grâce à *ADLConf*. Ensuite, il est possible de débiter le levé en temps réel : la marche à suivre spécifique aux *SP80* est indiquée dans la notice que nous avons réalisée. Cependant, plusieurs problèmes se sont dressés lors de la configuration : certains récepteurs ont présenté une erreur de configuration tandis que d'autres ne sont pas arrivés à se connecter aux contrôleurs. De plus, il était possible de contrôler la base et le mobile qu'à partir d'un seul contrôleur. Cela implique de ne pas pouvoir travailler sur plusieurs mobiles en même temps. Finalement, nous sommes arrivés à trouver comment séparer les contrôleurs de la base et du mobile.



Capture d'écran de l'affichage de points à mesurer en temps réel

Si finalement aucune mesure n'a été prise en temps réel, nous sommes cependant arrivés à déterminer la méthode de configuration des *SP80*. Dans le cadre de notre projet, cette technique aurait pu apporter une information en temps réel. Pour cela, il aurait fallu, à partir des points obtenus, créer des graphiques de trajectoires et d'oscillations pour observer directement sur le terrain les déformations de la route par exemple. Cependant, au vue des courts trajets que nous avons effectués, il était aussi simple et efficace de traiter les données et de réfléchir sur les résultats après la prise de mesures.

Conclusion

En somme, la grande cadence d'acquisition rapide des récepteurs SP80, n'étant pas interpolée et étant un véritable 20Hz, a des applications dans des domaines variés. Parmi ceux-ci, l'auscultation d'ouvrages d'art et la surveillance de la qualité des routes sont des domaines que nous avons explorés

Pour le premier domaine, la faible durée de nos sessions d'acquisition GNSS, qui toutefois permis de produire des résultats, gagnerait à être rallongée afin d'observer des phénomènes plus longs. Cela est cependant difficile étant donnée la très grande taille des fichiers produits avec cadence rapide de mesures. Enfin, l'apport du temps réel pour la surveillance est majeur, car il permet de constater des mouvements directement (utile notamment pour prévenir les incidents sismiques).

Pour le second, nos expériences ont permis de déterminer des méthodes de contrôle de la qualité de la voirie, qui gagneraient toutefois à être améliorées afin de produire des résultats sur des tronçons de route plus conséquents. En effet, toutes les routes ne peuvent pas être approximées à des plans.

Finalement, les pistes explorées lors de ce projet de fin de stage nous ont permis de distinguer à quelles fins les récepteurs GNSS à cadence d'acquisition de 20 Hz pourraient être utilisés. Toutefois, celles-ci pourront toutes être approfondies lors de projets et travaux ultérieurs afin d'être exploitées de manière plus concrète dans le futur.