

PROJET INGÉNIEURS 1^{ÈRE} ANNÉE

STABILITÉ DES SUPPPORTS EN GÉODÉSIE ET MÉTROLOGIE



ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES

Remerciements :

Antoine Pinte pour la photogrammétrie,
Jacques Beilin pour l'implication et la pédagogie,
Christian Pageot pour les installations du matériel.

Table des matières

INTRODUCTION	3
I. TOPOMÉTRIE AUTOMATIQUE	4
1. Protocole et mesures	4
2. Traitements.....	6
3. Résultats.....	8
4. Rotation.....	9
II. PHOTOGRAMMÉTRIE.....	10
1. Protocole et mesures	10
2. Traitements.....	12
3. Résultats.....	13
III. TRANSLATOMÈTRE	15
1. Protocole et mesures	15
2. Traitements.....	15
3. Résultats.....	16
IV. EXPLOITATION DES RÉSULTATS	17
CONCLUSION.....	19
BIBLIOGRAPHIE ET LOGICIELS.....	20
ANNEXE	21

INTRODUCTION

GeoMetre est un projet de métrologie européen cherchant à tester des nouveaux instruments de grande précision. Dans cette optique, l'impact de la stabilité des supports sur les erreurs est à prendre en compte. Ce dernier n'ayant jamais été quantifié, nous avons pour mission d'évaluer la stabilité de différents types de trépieds. Nous nous sommes intéressés aux trépieds coulissants en bois, en aluminium et aux pieds lourds. L'étude que nous avons réalisée porte sur sol dur et naturel.

Plusieurs méthodes ont été mise en place pour mesurer le déplacement des trépieds au cours du temps : des mesures directes au tachéomètre, au niveau ainsi que par séries photographiques.

Au-delà de la quantification de la stabilité des supports, il est intéressant d'évaluer la précision de chaque méthode utilisée pour des objets métriques. En effet, plusieurs paramètres sont à considérer comme la précision de l'appareil utilisé pour l'acquisition, la densité souhaitée pour les résultats et le type d'acquisition (temporelle ou spatiale).

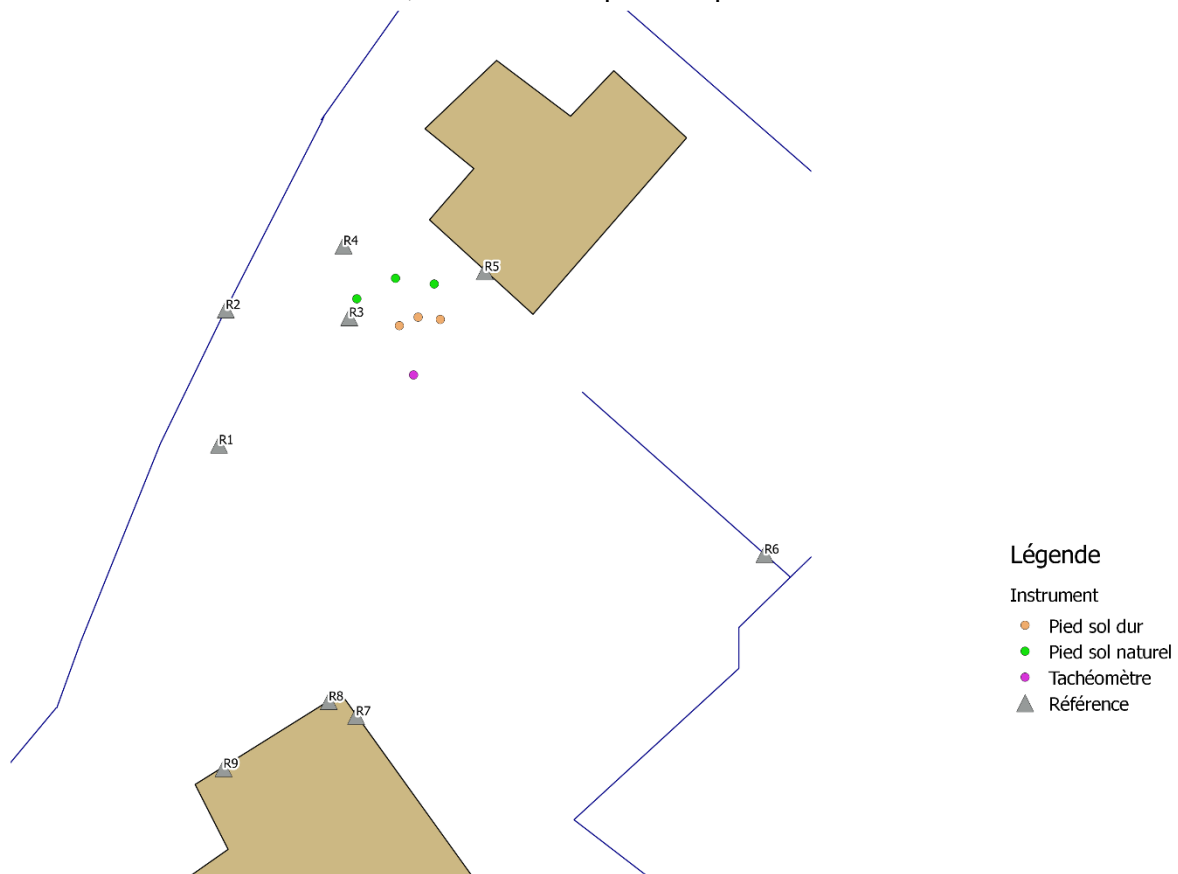


I. TOPOMÉTRIE AUTOMATIQUE

1. Protocole et mesures

L'objectif des mesures au tachéomètre est de calculer le déplacement éventuel des trépieds au cours du temps. Dans un premier temps, nous avons installé des mini-prismes d'auscultation sur deux des pattes du trépied (un en haut, un en bas) les trois n'étant pas visibles en même temps par le tachéomètre. Ayant un nombre limité de prismes, quatre prismes d'auscultation ont été placés par trépied.

Afin d'avoir des points fixes à chaque acquisition du tachéomètre, neuf références ont été vissées tout autour du chantier (fiches signalétiques dans le dossier). Ces points sont plus stables car solidement vissés dans des murs, murets ou les piliers à proximité.



Plan schématique de l'installation des références et des supports



Référence fixe sur un mur

Les trépieds ont été placés dans la position la plus stable possible, c'est-à-dire à une hauteur moyenne et sur une zone sans trop de dénivelé. Aucun poids supplémentaire n'a été posé sur les trépieds.

Une fois les mini-prismes placés, on procède à l'apprentissage des positions : un opérateur pointe manuellement sur les références, puis les cibles. Le tachéomètre enregistre ainsi la position. Après cette étape, les acquisitions automatiques peuvent être lancées. Etant donné que la stabilité doit être assurée afin de pouvoir mesurer des déplacements infimes de trépied, nous avons posé le tachéomètre sur le pilier.



Lors des premières acquisitions, nous avons rencontré quelques problèmes. Le tachéomètre ne parvenait pas à détecter le prisme posé sur les trépieds car la distance était trop courte. De plus, il y avait aussi des décalages de visées.

Nous avons donc calibré notre tachéomètre (horizontalité, collimation et recherche de cible automatique) en visant un point au loin.

La calibration ci-dessus ayant échoué, nous avons changé de tachéomètre.

Sachant que l'apprentissage avait été réalisé précédemment, nous avons décidé de conserver ces valeurs en visant sur une référence.

L'utilisation du logiciel C3-Géo a permis d'automatiser les mesures. Le tachéomètre réalise donc des cycles automatiquement. Un cycle est constitué de mesures en cercle I et II: neuf références dont l'ouverture et la fermeture sur la première référence (R1), ainsi que les points renseignés durant l'apprentissage.

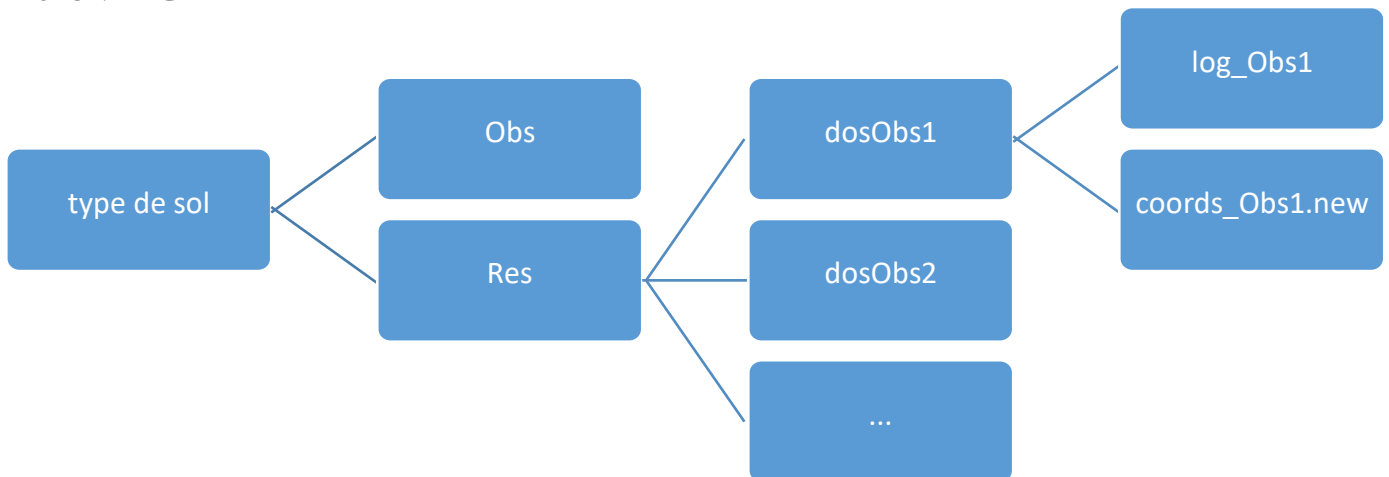
Il existe un timer qui permet de décider l'heure à laquelle lancer une acquisition. Nous ne l'avons pas utilisé comme nous étions toujours sur le terrain, cependant il est facilement envisageable d'imaginer une utilisation sur des chantiers plus longs, où l'opérateur n'est pas présent.

Nous avons effectué des mesures de déplacement sur sol dur (la dalle circulaire en béton) ainsi que sur sol naturel (sur l'herbe, dans la zone alentour). Concernant les pieds lourds, nous les avons retournés sans dévisser les prismes d'auscultation, tournés vers l'intérieur des pieds. En effet, les embouts des pieds sont conçus pour être plantés dans un sol naturel et posés à plat, pour plus d'adhérence, sur un sol dur.

2. Traitements

Le premier objectif des traitements est de déterminer les coordonnées de tous les points visés à l'aide du logiciel de compensation par moindres carrés Comp3D. Au vu du nombre d'observations pour chaque type de sol, une automatisation du processus de compensation est nécessaire. De ce fait, nous avons d'abord créé un fichier cor pour chaque type de sol avec un ensemble de cycles indépendant du reste des mesures en programmant sous Python. Une référence est choisie comme GØ du chantier puis les coordonnées sont déterminées par rayonnement depuis la station. Ainsi, cinq cycles acquis le mercredi 10 juillet 2019 pour le sol dur et quatre cycles acquis le jeudi 11 juillet 2019 pour le sol naturel ont été utilisés dans ce calcul et la référence R5 comme GØ.

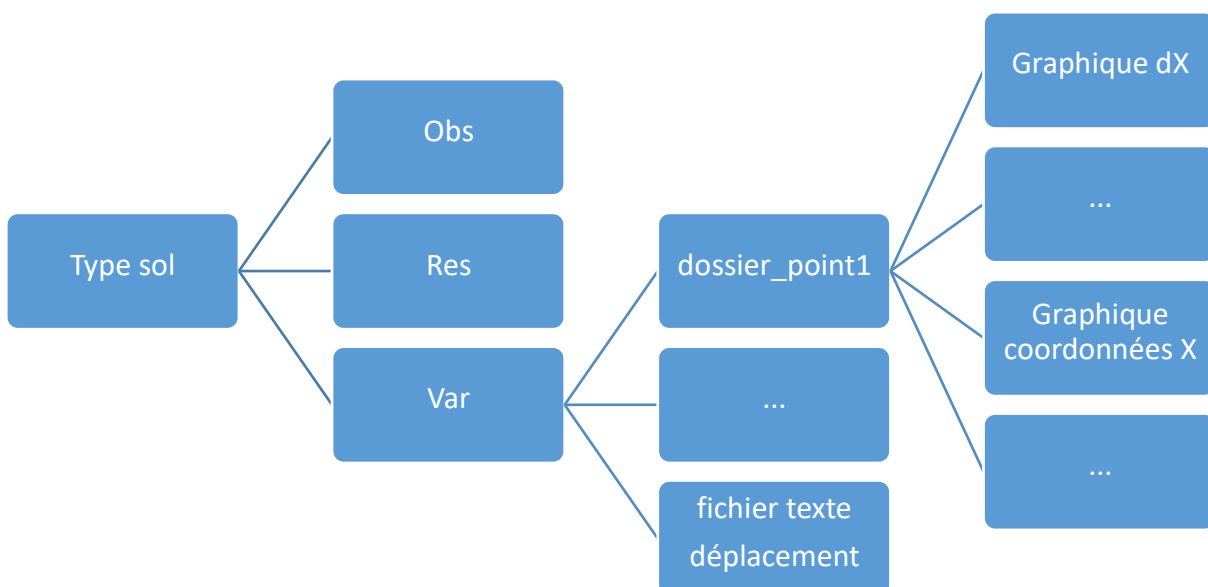
La phase suivante consiste à la détermination des coordonnées pour chaque fichier d'observations. Dans ce but, nous avons écrit un fichier de configuration Comp3D pour chaque cycle à partir d'un modèle puis lancer la compensation depuis un programme sous Python. Cependant, le processus ne fonctionne pas au début suite à un problème de chemin. Afin de le résoudre, le chemin du fichier d'observation doit être absolu et on doit ajouter le dossier de travail « . / » de Comp3D au début du chemin absolu, au niveau de la balise « root OBS file » uniquement (voir lignes surlignées sur la [Figure I.1](#))



Arborescence des résultats de la compensation par Comp3D

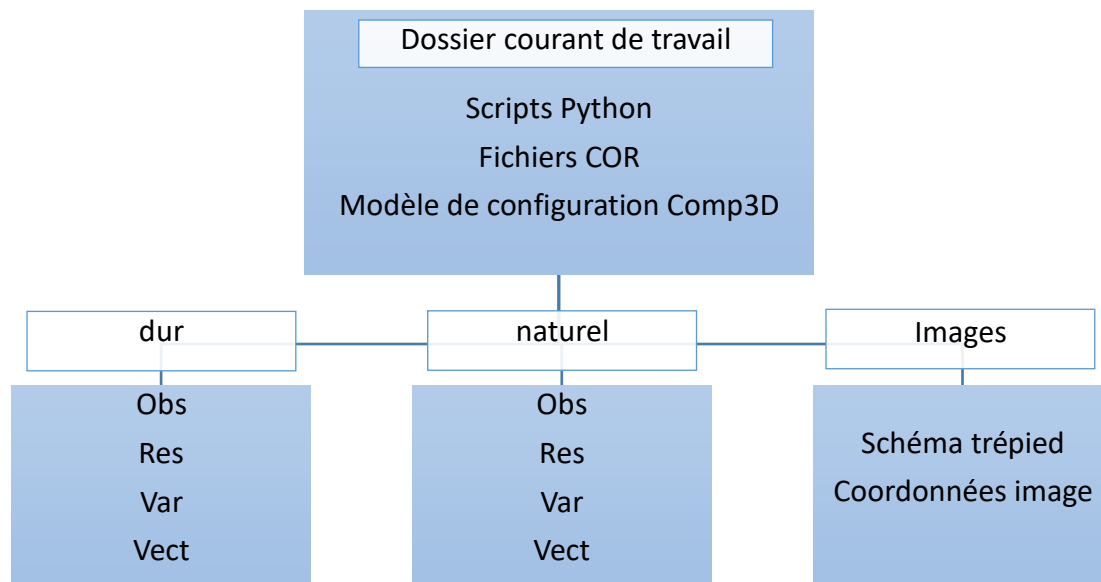
Nous obtenons des compensations convergentes avec un σ_0^2 proche de un au final.

Une fois les coordonnées calculées, le second objectif des traitements topométriques est réalisé. Il s'agit de déterminer les déplacements sur chaque axe des cibles sur les trépieds. Nous avons choisi d'évaluer les mouvements d'une cible deux valeurs de coordonnée par deux et ces résultats sont enregistrés dans un fichier texte et affichés dans un graphique chaque axe et chaque cible.



Arborescence des résultats de la détermination des déplacements

D'autre part, pour chaque type de trépied, les vecteurs de déplacement des points visés par rapport aux coordonnées calculées dans le COR sont déterminés et représentés en planimétrie et en altimétrie sur des schémas avec échelle.



Arborescence finale des résultats de l'acquisition topométrique

3. Résultats

Sol dur

L'ensemble des trépieds étudiés ont un mouvement sur tous les axes mais d'un faible ordre de grandeur (dixième de millimètre). Les variations sont généralement des oscillations ; les directions de ces déplacements dépendant du type de trépied.

Le trépied en aluminium se redresse à court terme (30 minutes) de 0,3 mm sur l'un des pieds contre 0,15 mm sur l'autre pied observé. Cette situation est inversée en planimétrie, où le pied qui varie le plus devient celui qui varie le moins et vice-versa.

Sur le long terme, nous observons les mêmes variations cependant plus faibles.

De même, les trépieds en bois et pieds lourds se redressent aussi avec des oscillations maximales de 0,4 mm (voir [Figure I.3](#)).

Tous les trépieds présentent un déplacement plus important au niveau de la tête.

	Déplacement planimétrique (mm)	Déplacement altimétrique (mm)
Trépied en bois	0,2	0,1
Trépied en aluminium	0,2	0,2
Pied lourd	0,2	0,2

Variations moyennes à court terme des trépieds étudiés

	Déplacement planimétrique	Déplacement altimétrique
Trépied en bois	0,1	0,2
Trépied en aluminium	0,1	0,3
Pied lourd	0,3	0,4

Variations moyennes à long terme des trépieds étudiés

Sol naturel

L'instabilité d'un sol meuble génère de fortes oscillations en début d'acquisition – supérieures au millimètre - pour tous les types de support à court terme. A l'inverse, nous remarquons qu'à moyen terme, c'est-à-dire sur une journée, les oscillations sont plus faibles (de l'ordre du demi-millimètre).

Nous observons un redressement de tous les trépieds, plus important pour le pied lourd à moyen terme, de l'ordre du millimètre (voir [Figure I.2](#)), tandis que les trépieds coulissants ont tendance à se lever.

	Déplacement planimétrique	Déplacement altimétrique
Trépied en bois	0,2	0,2
Trépied en aluminium	0,1	0,1
Pied lourd	0,2	1

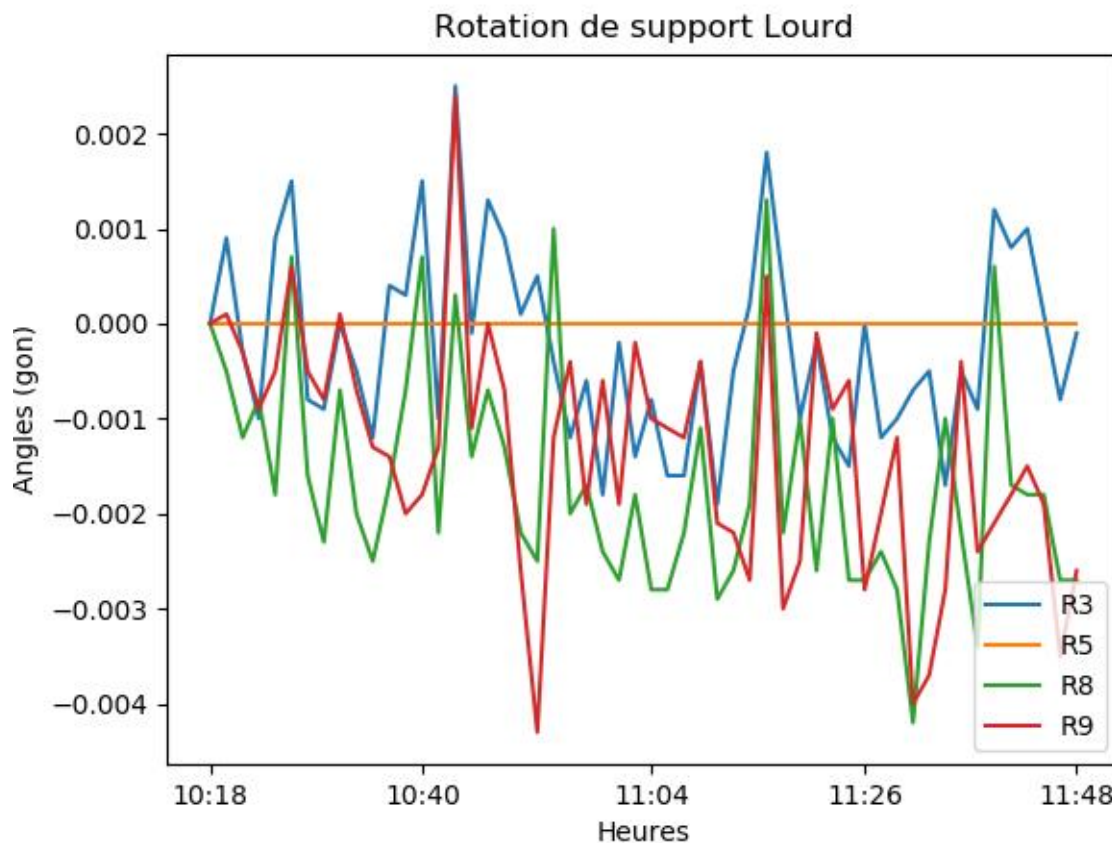
Variation à court terme des trépieds étudiés (en mm)

	Déplacement planimétrique	Déplacement altimétrique
Trépied en bois	0,3	0,1
Trépied en aluminium	0,5	0,1
Pied lourd	0,2	1

Variation à moyen terme des trépieds étudiés (en mm)

4. Rotation

Pour quantifier plus précisément la rotation des trépieds, nous avons mené une étude complémentaire. Nous avons placé un tachéomètre sur chaque trépied à étudier et nous avons visé automatiquement des références fixes. Les mesures obtenues permettent d'obtenir un décalage au cours du temps et ainsi de déterminer une valeur de déplacement.



Une fois l'ouverture réduite, nous observons un décalage maximal de 4 mgon pour le pied lourd.
Cf. [Figure IV.1](#) et [2](#)

II. PHOTOGRAMMÉTRIE

1. Protocole et mesures

En parallèle de l'utilisation des tachéomètres pour obtenir des mesures des éventuelles variations de position du trépied, nous avons utilisé des techniques photogrammétriques. Cela nous permet d'avoir de la redondance de données sur les trépieds.

L'objectif était également de justifier l'utilisation d'un trépied plutôt qu'un autre lors d'un chantier. Nous avons ainsi décidé de modéliser les trois trépieds en 3D grâce au logiciel MicMac à différents instants, dans l'optique de les comparer plus tard.

Dans ce but, nous avons installé des cibles à différents endroits des trépieds : sur le plateau et plusieurs sur les pattes.



Nous avons également disposé des cibles sur le sol ou sur des piquets pour avoir de références dans l'environnement qui sont supposées immobiles. C'est l'équivalent des références pour les mesures au tachéomètre.

Dans les séries de photos, nous avons des clichés qui se concentrent autour des différents trépieds individuellement ainsi que des clichés plus globaux afin de placer les trois trépieds dans le même référentiel.

Nous avons effectué à chaque fois des séries de plus de 150 photos : en effet, il est recommandé de prendre une photo tous les 10 degrés autour du centre d'intérêt, soit au moins 36 photos par trépied. De plus, comme l'ensoleillement de la scène est variable, il a été nécessaire de changer les paramètres de la prise de vue (temps d'exposition et ISO notamment) entre deux séries. Nous avons même parfois dû changer le temps d'exposition pendant la prise de vue, comme l'ombre du sapin surplombant les trépieds ne les couvrait pas tous.

Pour tenter de remédier à ce problème, nous avons utilisé un parasol pour faire de l'ombre et ainsi pouvoir faire la série de photos en une seule fois. Cependant, lors des traitements effectués, l'ombre du parasol a été considérée comme fixe par le logiciel, et la reconstruction 3D a donc échoué.

Cette méthode est intéressante pour compléter les données obtenues avec le tachéomètre car elle est facile à mettre en œuvre. Une acquisition est effectivement relativement courte (une demi-heure environ), et il est possible de laisser longtemps les trépieds, pour mesurer des déplacements sur de longs laps de temps. Il est donc faisable de réaliser souvent des acquisitions, avec des moyens peu lourds.

2. Traitements

Après avoir récupéré les jeux de photographies résultant des acquisitions faites sur les différents trépieds observés, il ne reste plus qu'à les traiter. Nous utilisons le logiciel MicMac pour traiter les sets de photos et le logiciel CloudCompare pour pouvoir exploiter des nuages de points. Pour chacun des différents jeux, la démarche est identique et se déroule comme suit :

1. Recherche de points de liaison

Les points de liaison sont des points pouvant être repérés au minimum sur deux photos différentes. Ils nous serviront de point d'ancrage pour repositionner les différentes prises de vues entre elles. Le logiciel utilisé reconnaît ces points à partir des valeurs radiométriques contenues dans les pixels voisins sur les images. Nous effectuons cette partie du traitement avec MicMac l'aide de la commande suivante :

```
>> mm3d Tapioca MulScale «.*JPG» 1000 1500
```

MulScale est une méthode de recherche de points de liaison qui fractionne les images et les recoupe entre elles pour afin de ne pas rechercher de points dans l'entièreté de chaque image à traiter. Dans notre cas, nos images de dimension 6000 * 4000 pixels sont découpées en vingt-quatre sous-images de dimension 1000 * 1000 pixels. Si un point de l'une de ces sous-images possède déjà un simili sur une autre image, une recherche sur les autres points de cette image est effectuée dans une zone de 1500 pixels autour du point déjà trouvé. Cela permet de réduire le temps de calcul, déjà très élevé en raison du grand nombre d'images à traiter.

2. Calcul de l'orientation relative

Une fois que des points de liaison ont été trouvés, nous avons orienté les différentes prises de vues dans un repère local. Pour cela, nous recalons les prises de vues en jouant sur leurs positionnements dans l'espace ainsi que les paramètres en lien avec la calibration de l'appareil. Pour cela on utilise la commande MicMac suivante :

```
>> mm3d Tapas RadialStd «.*JPG» Out=nom_du_dossier_ori
```

Le dossier ori ainsi créé contient des informations sur la calibration de l'appareil et le positionnement compensé des angles de prise de vues. Il sera au cœur des traitements qui suivront. Après cette étape, il est déjà possible de vérifier si les acquisitions ont donné de bons résultats en utilisant la commande apericloud pour visualiser les points de liaison et les prises de vues :

```
>> mm3d Apericloud «.*JPG» nom_du_dossier_ori
```

3. Saisie des points d'appuis

Après la mise en place relative, on obtient un nuage de points implanté dans un repère arbitraire. Afin de pouvoir faire des mesures sur notre nuage de points, nous avons renseigné des points d'appuis préalablement mesurés au tachéomètre en utilisant la commande :

```
>> mm3d SaisieAppuisInitQT ".*JPG" nom_du_dossier_ori fi-  
chier_de_coordonnées.xml SaisieAppuis.xml
```

Les points d'appuis sont des points dont on connaît les coordonnées terrain et image. En général, nous avons pointé trois points différents par prise sur six images différentes lors de notre saisie. Cette saisie a engendré un fichier S2D et un fichier S3D contenant les coordonnées des points d'appuis que l'on a visé sur chaque image utilisé (en 2D) et dans un repère spatial (en 3D). Ensuite, nous avons compensé ces coordonnées 3D en injectant les coordonnées mesurées sur le terrain avec la commande GCPBascule :

```
>> mm3d GCPBascule ".*JPG" Ori-nom_du_fichier_ori nom_du_fi-  
chier_ori_absolue fichier_de_coordonnées.xml SaisieAppuis-S2D.xml
```

Le dossier ori en sortie de cette commande est contient le repère commun à toutes les prises de vues.

4. Reconstruction 3D

Une fois l'orientation absolue terminée, nous avons lancé une reconstruction 3D de nos trépieds à l'aide de la commande :

```
>> mm3d C3DC MicMac ".*JPG" Ori-nom_du_dossier_ori_absolue
```

Cette commande nous fournit finalement un nuage de points 3D dense que l'on pourra nettoyer et observer avec CloudCompare.

3. Résultats

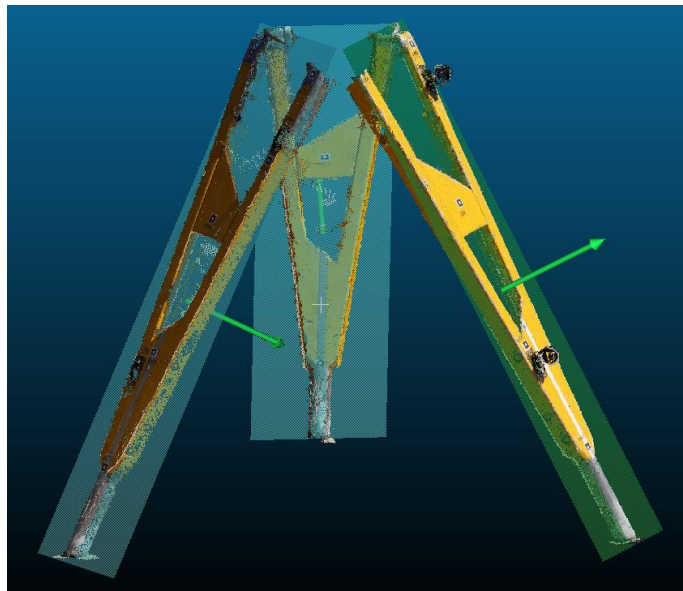
Après traitement sur MicMac, nous obtenons un nuage de points pour chaque série de photos, manipulable sur CloudCompare. Nous pouvons récupérer les coordonnées des points correspondant au centre de nos cibles et ainsi mesurer le déplacement des points sur nos trépieds entre chaque série de photo.

Pour mettre en évidence la torsion des pieds de chaque trépied, nous les avons isolés du reste du nuage de point afin de pouvoir leur calculer un plan moyen. On récupère ainsi le vecteur normal de chaque plan calculé. L'évolution de l'angle orienté entre le vecteur normal et le vecteur du début des mesures caractérise la torsion des trépieds.

Nous remarquons que le pied lourd ne se tordsade que de $0,20^\circ$ sur deux pieds, ce qui reste très faible. En revanche, l'un des pieds se tordsade de 1° . Cette valeur élevée peut s'expliquer par le manque de précision ou par un facteur extérieur (dilatation des pieds...). Ces valeurs ne nous semblent pas cohérentes étant donné que les meilleurs écarts-types de cette méthode sont de 0,5 mm. Une amélioration est possible en densifiant les nuages de points et en nettoyant plus précisant ces derniers.



Nuage de points nettoyé



Plan moyen

III. TRANSLATOMÈTRE

1. Protocole et mesures

Dans un premier temps, nous souhaitions effectuer des mesures de translation horizontale et verticale.

Afin de mesurer la mire horizontalement, nous avons dû utiliser un pentaprisme. Le premier essai a été un échec. La mire étant placée à l'horizontale sous le trépied, la distance la séparant de l'appareil était trop faible. Une solution possible était de prendre une photo de la mire - la faisant apparaître plus petite donc plus loin - afin de leurrer l'appareil.

Dans un premier temps, il a fallu photographier la mire. Nous avons choisi d'utiliser la mire de deux mètres car peu utilisée par les autres groupes. Nous avons commencé par photographier l'ensemble de la mire. Le niveau ne parvenait pas à effectuer une lecture, peut-être à cause du manque de lisibilité. Nous avons ensuite réduit progressivement la portion de mire photographiée en estimant l'emprise visible par le niveau.

Plusieurs tests ont été effectués pour l'impression car on cherche à obtenir une photo de la meilleure qualité possible. Nous avons testé une impression à jet d'encre. Cependant, nous avons privilégié l'imprimante laser car plus précise. Aucun de ces deux types d'impression n'a permis d'obtenir une mesure. Dans un dernier espoir, nous avons testé l'impression sur papier photo, en vain. Les mesures de translation horizontale ont donc été abandonnées.

Nous nous sommes donc concentrés sur la mesure d'une éventuelle translation verticale. Dans ce but, nous avons solidement attaché la mire à un pilier. Un niveau est ensuite posé sur chacun des trépieds dont on cherche à mesurer le déplacement. Les mesures sont automatisées à l'aide du logiciel Translato sous Windows et s'étendent sur une journée entière afin d'obtenir des résultats toutes les quinze secondes sur une longue période.

2. Traitements

Le logiciel d'observation génère un fichier texte contenant pour chaque lecture la date et l'heure de prise de mesure, la lecture sur la mire et la distance entre le niveau et la mire. La première observation est choisie comme référence pour le calcul sous Python. Cette dernière est soustraite aux mesures suivantes et nous obtenons les déplacements verticaux d'un type de trépied.

Les données temporelles sont converties en seconde et modifiées suivant l'ordinateur utilisé car ces derniers sont en retard par rapport à l'heure locale : 12 minutes pour le Panasonic CF-19 et 2 heures pour le Panasonic CF-52 (nous supposons qu'il est réglé à l'heure GMT).

Les distances ont, dans un premier temps, été traitées de la même façon que les lectures de mire. Cependant, la précision apportée étant centimétrique (confer figure), ces mesures n'ont pas été gardées dans les traitements (confer [Figure III.1](#)).

3. Résultats

Comme les traitements pour les données du niveau ne sont pas très longs, comparés aux traitements de photogrammétrie par exemple, il a été possible d'obtenir très rapidement des résultats. Nous avons ainsi, grâce au script python codé, un diagramme exprimant pour chaque trépied la variation entre la première lecture effectuée sur la mire (au temps $t = 0$) et la lecture au temps t . Il y a donc six graphiques : deux pour chaque pied (sol dur et sol meuble).

Pour le pied lourd, nous observons sur le sol naturel une augmentation croissante de la variation vers le haut au cours du temps, d'une ampleur de 1,3mm. Le début des mesures s'effectue à 8h44 et vers 12h49, le pied a eu un déplacement vertical d'environ 0,0006m, soit six dixièmes de millimètre en 4h.

Un saut est observable vers 14h, où la variation passe d'environ 0,0007m à 0,0010m.

En ce qui concerne le pied lourd sur sol dur, une variation quasi-linéaire est observable par morceaux de 9h31 (heure de début de l'expérience) à environ 15h. Le trépied aurait tendance à avoir une translation verticale vers le sol, contrairement au sol meuble.

Entre 15h28 et 17h02 (fin de l'expérience), la variation n'est pas significative.

L'amplitude totale sur la journée est de six dixièmes de millimètre, soit environ la moitié de celle observée sur sol naturel.

Pour le trépied en bois, le niveau indique une variation verticale entre 8h55 (heure de début des observations) et environ 13h pour le sol naturel. S'ensuit une légère descente vers le sol, puis une montée jusqu'à la fin de l'expérience (voir [Figures III.3](#)).

L'amplitude totale est d'environ quatre dixièmes de millimètre, soit moins d'un demi-millimètre.

Quant au sol dur, le trépied commence par s'enfoncer légèrement (sur moins d'un dixième de millimètre), puis se surélève un peu et s'enfonce à nouveau d'environ 12h15 jusqu'à 17h10, fin des observations.

Au total, le trépied a bougé de presque quatre dixièmes de millimètres, mais en montant et descendant.

Pour le trépied en aluminium sur sol naturel, des variations d'environ deux dixièmes de millimètre sont observées dans le sens de la montée et de la descente du trépied de 8h51 (heure du début de l'expérience) jusqu'à environ 10h. Par la suite, les variations augmentent, en relevant le trépied jusqu'à la fin de l'expérience à 17h02, avec un saut un peu après 13h dans le sens de la descente.

L'amplitude totale est d'environ quatre dixièmes de millimètre, soit environ la même amplitude que pour le trépied en bois sur sol naturel.

Le trépied en aluminium sur le sol dur reste à peu près stable pendant les deux premières heures d'observation, puis s'enfonce sur le reste de l'expérience (voir [Figures III.2](#)). L'amplitude des variations est d'environ trois dixièmes de millimètres, soit environ la même chose que le trépied en bois sur le sol dur.

	Sol dur	Sol naturel
Trépied en aluminium	0,3	0,6
Trépied en bois	0,3	0,35
Pied lourd	0,6	1,2

Amplitude maximale des variations verticales des trépieds (en mm)

IV. EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Il est communément admis que les pieds lourds sont plus stables que les trépieds en aluminium ou en bois. De plus, à l'IGN, ceux en bois sont plus plébiscités que ceux en aluminium, malgré la légèreté de ces derniers.

Comme explicité précédemment, nous avons utilisé trois méthodes différentes pour essayer de quantifier le mouvement des trépieds au cours du temps. Cependant, il apparaît qu'au cours de la journée, les trépieds peuvent se retrouver à l'ombre comme au soleil, induisant également des variations de position.

Il est possible de calculer la dilatation des trépieds en bois et en aluminium grâce à la formule suivante :

Ainsi, le trépied en aluminium se dilaterait moins que celui en bois, mais chaufferait plus au soleil car conducteur de chaleur.

Le pied lourd est composé de métal et de bois, il est donc plus hasardeux de calculer son coefficient.

Après avoir observé les variations de position de chaque trépied tout au long du projet à l'aide de trois méthodes, nous pouvons affirmer que quel que soit le trépied, il va bouger au cours du temps. De plus, installer un trépied sur sol naturel va induire moins de précision sur les mesures que sur un sol dur.

Si les pieds lourds sont plutôt reconnus pour leur stabilité, nous avons montré dans notre étude, à l'aide de la méthode photogrammétrique qu'ils ont tendance à moins vriller que les autres, permettant d'effectuer des fermetures correctes. Cependant, les deux autres méthodes permettent d'affirmer que les pieds lourds induisent autant d'imprécisions sur les mesures (déplacement vertical notamment) que les autres trépieds.

Cependant, il est important de noter que lors nos expériences, aucun opérateur ne se trouvait à proximité des trépieds, comme nous avons automatisé les mesures. Nous pensons que lors d'un chantier avec un opérateur autour du trépied, le pied lourd représente un net avantage car moins sensible aux vibrations et aux chocs. Utiliser du matériel automatique permettrait, sur des chantiers assez courts, d'utiliser des trépieds plus légers et de simplifier la logistique.

Cela est d'autant plus valable pour les stations libres, où un centrage n'est pas nécessaire et où l'on

peut privilégier les trépieds coulissants.

La précision des appareils et des techniques peut permettre d'accorder plus de crédit à une méthode plutôt qu'à une autre. La précision du tachéomètre utilisé est de 0,3 mgon et celle du niveau est de 0,4 mm. L'ensemble de nos variations étant supérieures à ces valeurs, il existe bien un phénomène : les trépieds bougent. Les variations ne sont pas uniquement dues à l'incertitude des appareils.

Par ailleurs, les différentes méthodes que nous avons utilisées au cours de notre stage ont toutes leurs points forts et leurs faiblesses.

Ainsi, lors de l'expérience topométrique, nous avons remarqué qu'il est possible de laisser l'acquisition au tachéomètre longtemps, même la nuit, car les prismes n'ont pas besoin d'être éclairés (contrairement à la mire et aux trépieds si on les prend en photo). De plus, le tachéomètre est un instrument qui permet d'obtenir une très grande précision pour les visées, et qui limite de nombre de points pris (ici, 9 références, 6 mini prismes d'auscultation sur les trépieds et 3 prismes). Le traitement des données est également plutôt rapide lorsqu'on a l'algorithme.

Cependant, le tachéomètre nécessite des calibrages et des corrections, qui peuvent être source d'erreurs.

En ce qui concerne la photogrammétrie, nous obtenons une grande densité de points, et plus on prend de photos, plus la précision peut être améliorée. La mise en place de cette technique est en outre facile : seul un appareil photo est nécessaire.

Cependant, les traitements sont lourds et longs, surtout quand il y a une grande quantité de photos. Il est aussi compliqué de prendre des photos à tous les moments de la journée, en raison de la variation de luminosité, et presque impossible la nuit sans éclairage. Cette technique serait plus précise sur de plus petits objets que des trépieds.

Le niveau, quant à lui, fonctionne assez simplement, ce qui peut éviter des erreurs comme celles du tachéomètre. Le traitement est également très facile, car un simple programme python permet d'effectuer des diagrammes interprétables. Cet appareil est également très précis. Cependant, le niveau permet d'obtenir une seule dimension de mesure, et donne ainsi moins d'informations que les autres méthodes (3 dimensions pour les deux autres).

Toutes ces méthodes concordent sur les données obtenues pour le sol naturel, spécialement le tachéomètre et le niveau.

CONCLUSION

Au cours de ce stage, nous avons eu comme objectif de tenter de quantifier le déplacement des trépieds au cours du temps, dans le but de pouvoir assigner des trépieds aux précisions que l'on souhaite obtenir.

Nous avons pour cela utilisé trois méthodes : la topométrie, la photogrammétrie et le niveau. En parallèle des protocoles et des expériences que nous avons réalisées, nous avons pu aussi comparer ces méthodes. La photogrammétrie nous a paru non adaptée aux objets de taille métrique pour la précision recherchée.

De plus, les résultats obtenus permettent de conclure sur le fait qu'installer un trépied sur un sol naturel augmente les erreurs en précision de l'appareil, et que sur la période d'observation, les trépieds sont d'égale stabilité sur sol dur. Les pieds lourds ont cependant tendance à moins vriller que les autres.

Ce stage nous a permis de parfaire nos connaissances dans plusieurs domaines (topométrie, nivellement, photogrammétrie), ce qui rendait le sujet intéressant et complet.

BIBLIOGRAPHIE ET LOGICIELS

- C3-Géo
- CloudCompare
- Comp3D, logiciel de l’Institut National de l’Information Géographique et Forestière (IGN)
- *Documentation Python 3* [en ligne]. Python Software Foundation
[Consulté le 15 juillet 2019]. Disponible sur <https://docs.python.org/fr/3/library/>
- *DNA03/DNA10 User Manual*. Leica Geosystems, p. 147
- MicMac, logiciel de l’Institut National de l’Information Géographique et Forestière (IGN)
- Translato

ANNEXE

```
data=
{
    "config" :
    {
        "center_latitude" : 44.0,
        "compute_type" : 0,
        "config_file" : "/home/dpts/Documents/work/Script/work.comp", => CHEMIN DU
FICHER DE CONFIGURATION A CHANGER
        "convergence_criterion" : 0.001,
        "description" : "",
        "files_unit" : 1,
        "force_iterations" : 0,
        "internal_constraints" : false,
        "invert_matrix" : false,
        "lang" : "fr",
        "local_center" :
        [
            0.0,
            0.0,
            0.0
        ],
        "max_iterations" : 100,
        "name" : "",
        "nb_digits" : 6,
        "proj_center" :
        [
            0.0,
            0.0,
            0.0
        ],
        "proj_def" : "+proj=lcc +lat_1=49 +lat_2=44 +lat_0=46.5 +lon_0=3 +x_0=700000
+y_0=6600000 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs <>",
        "refraction" : 0.12,
        "root_COR_file" : "corFile", => CHEMIN DU FICHER COR A CHANGER
        "root_OBS_file" : "obsFile", => CHEMIN DU FICHER OBS A CHANGER
        "unit_name" : "g",
        "use_proj" : false
    }
}
```

Figure I.1 : Modèle de fichier de configuration Comp3D

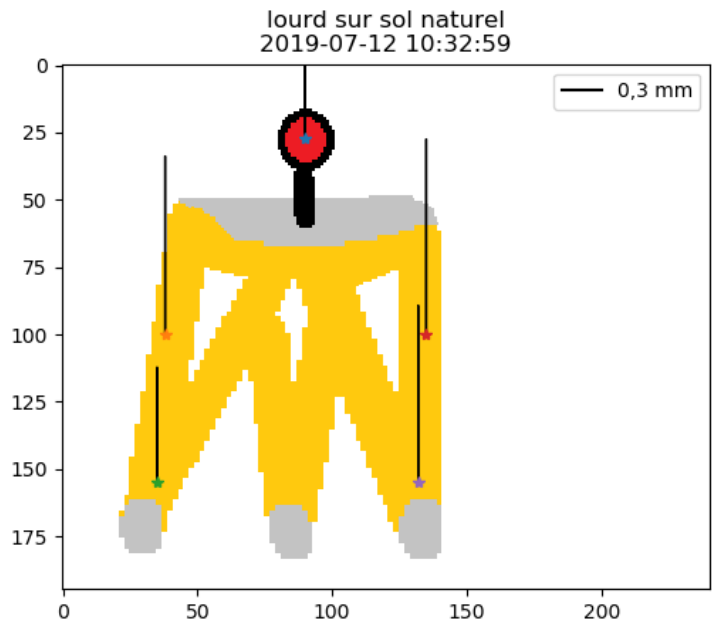
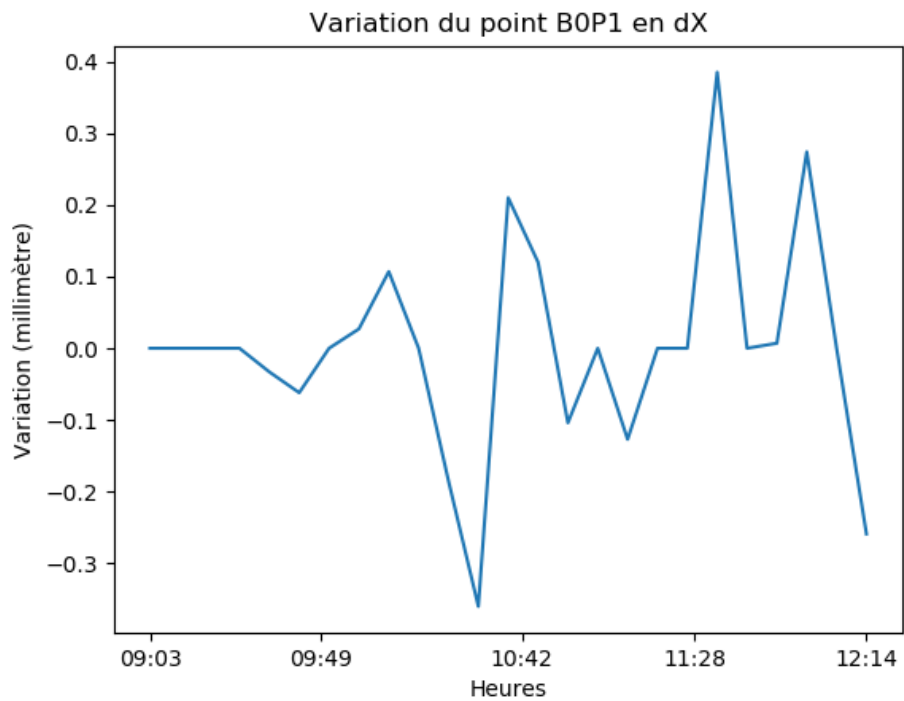


Figure I.2 : Mouvement verticale du pied lourd



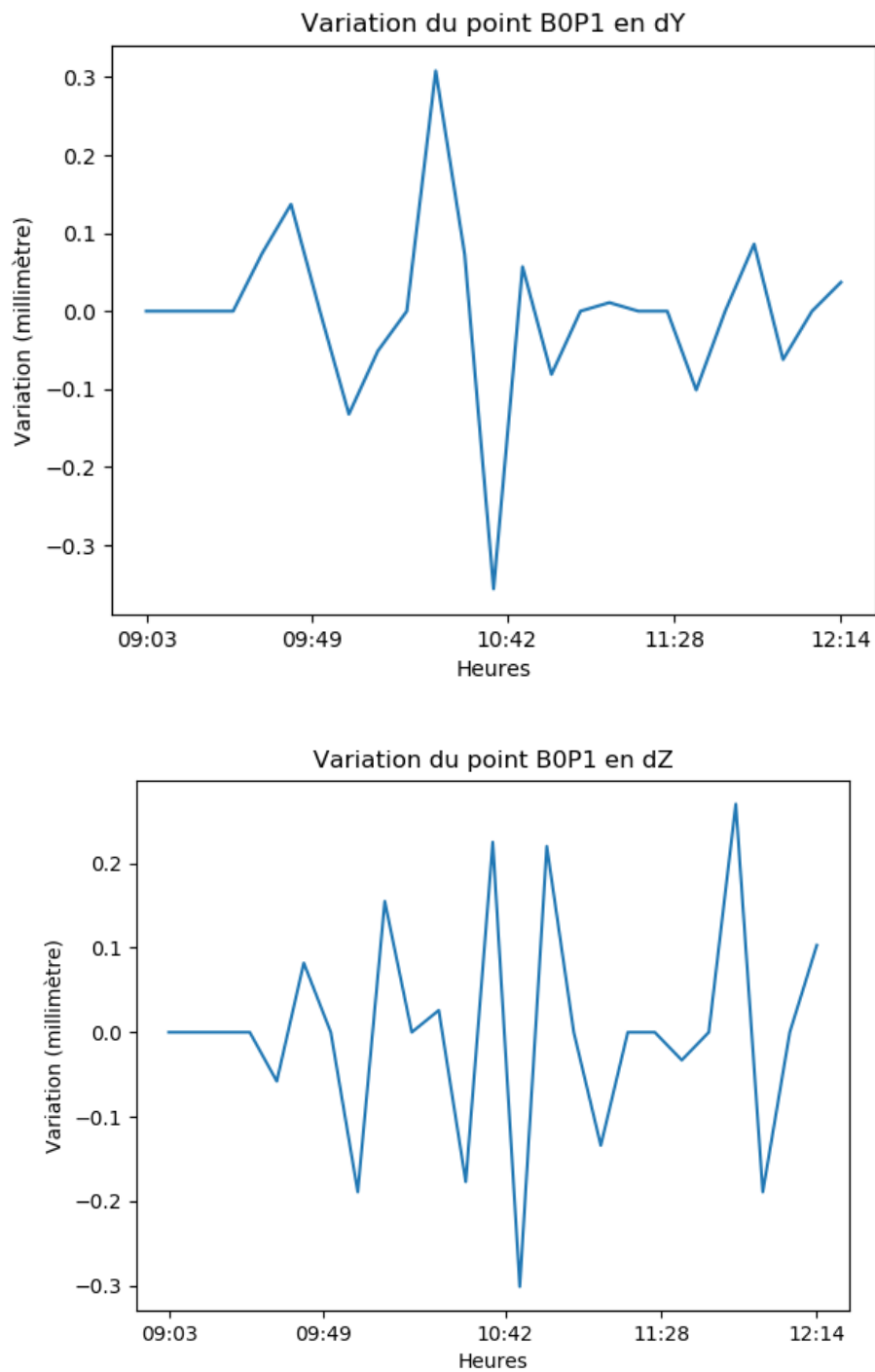


Figure I.3 : Variations de la cible B0P1 sur sol dur

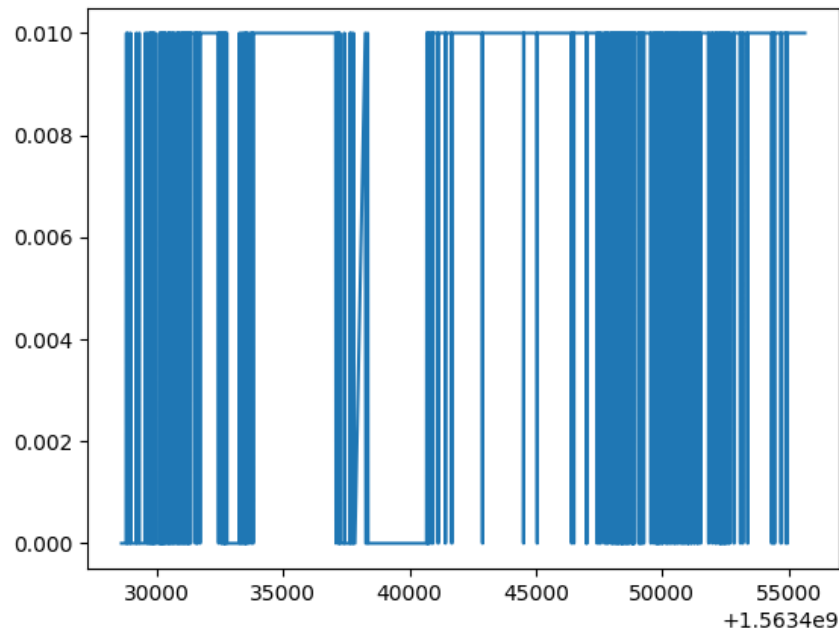
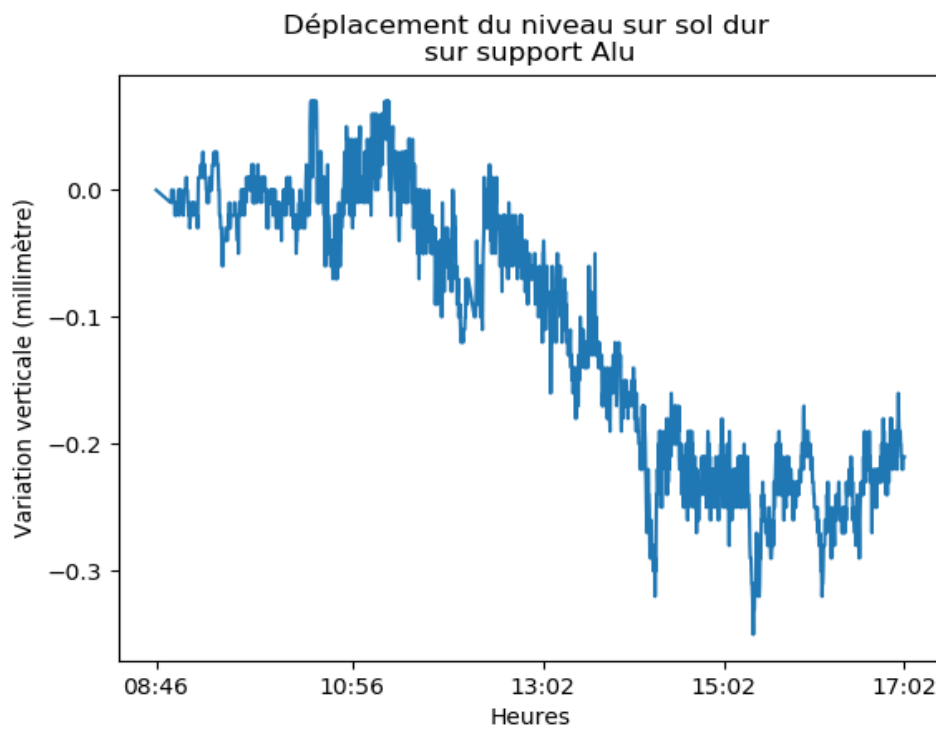


Figure III.1 : Variation de la distance mesurée au niveau sur un pied lourd



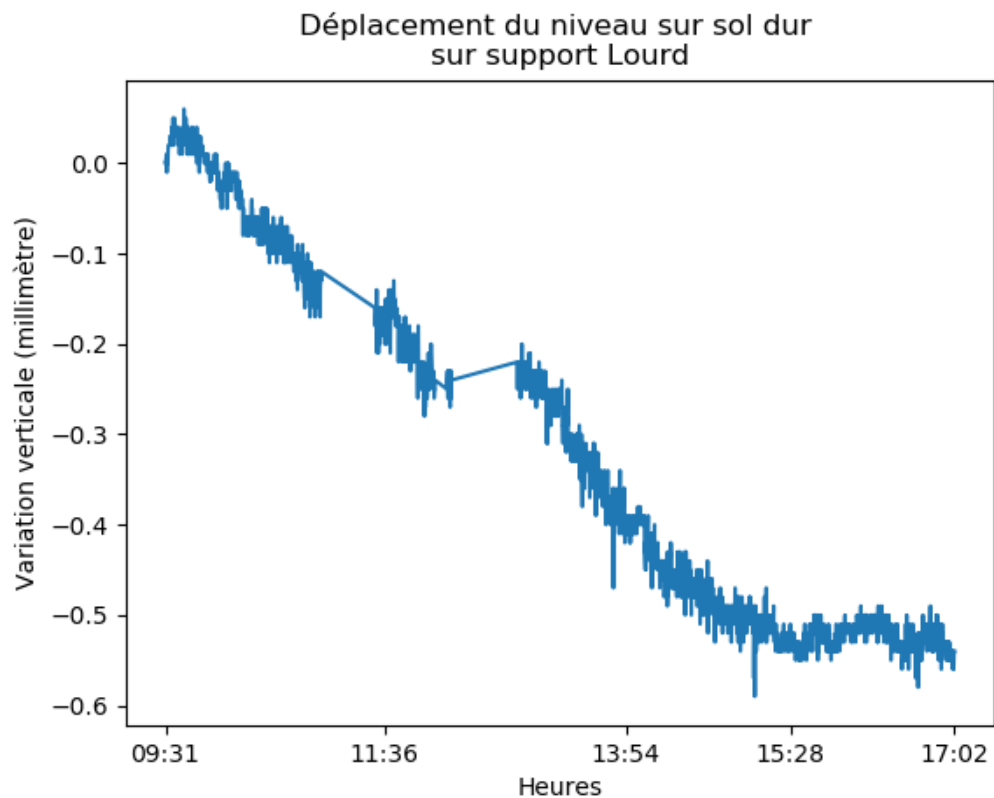
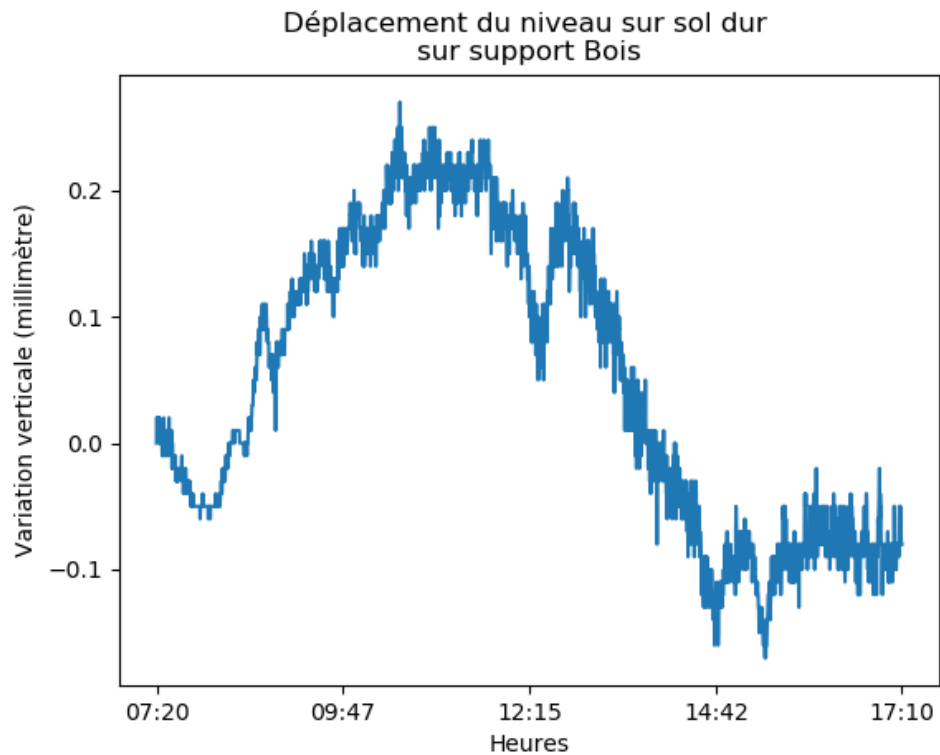
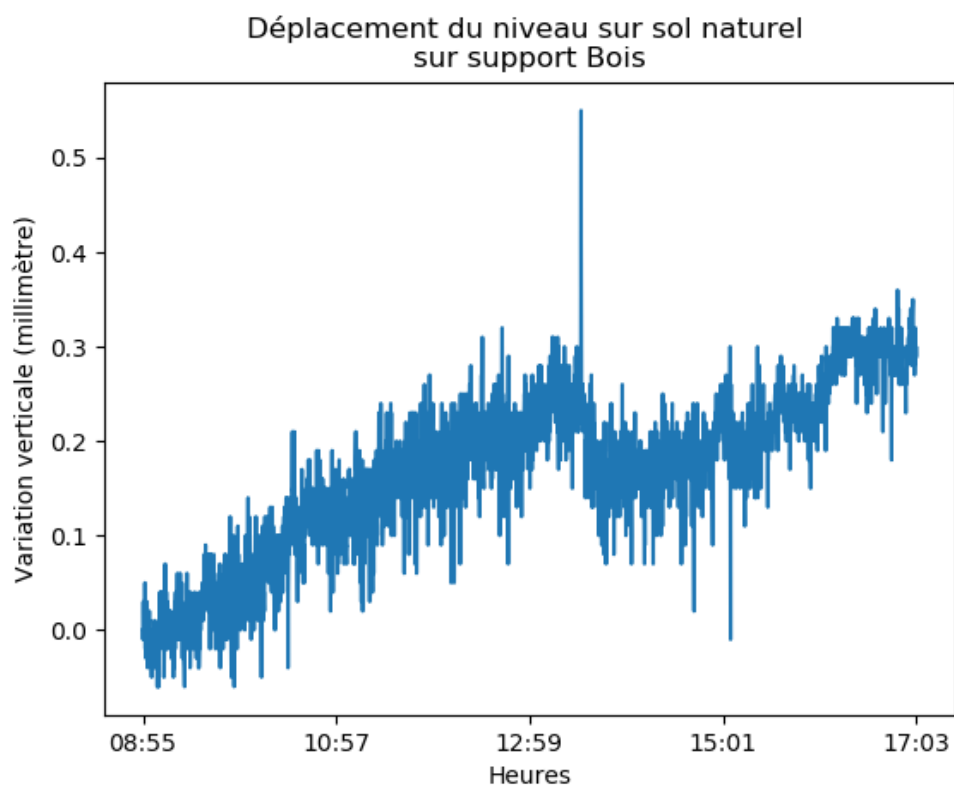
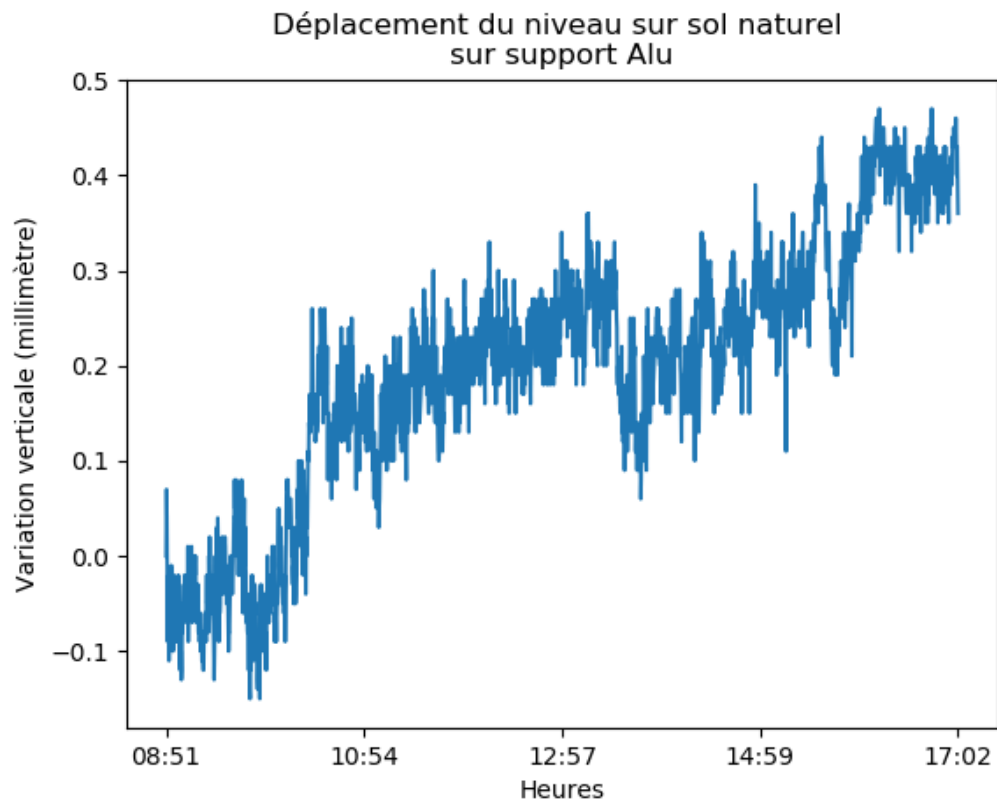


Figure III.2 : Variation verticale des trépieds sur sol dur



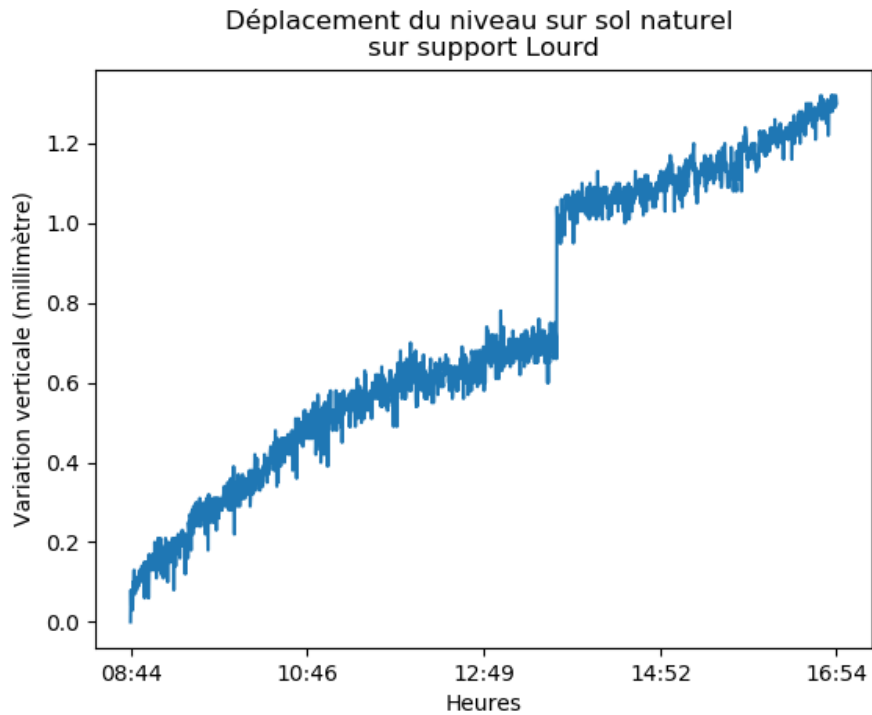


Figure III.3 : Variation verticale des trépieds sur sol naturel

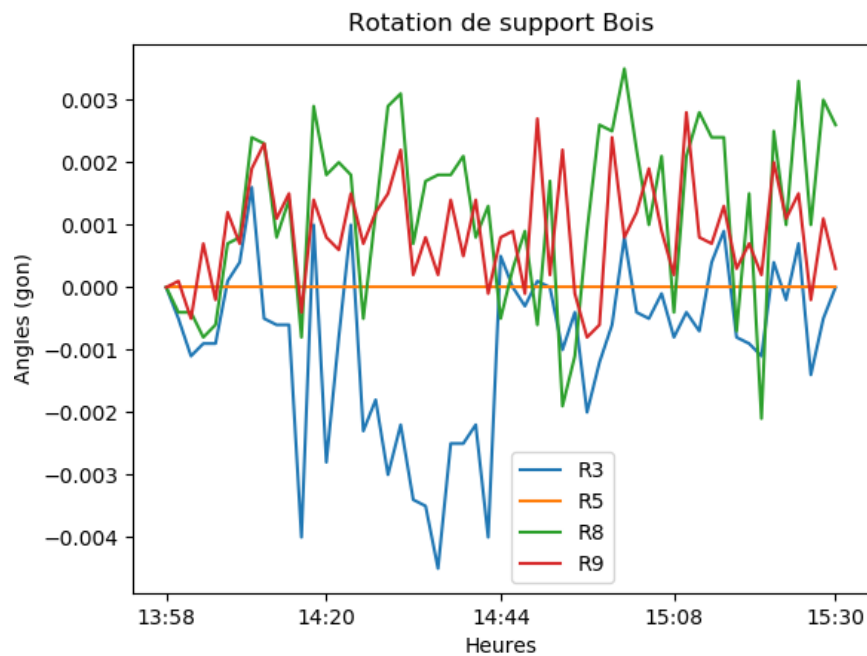


Figure IV.1 : Ecart de mesure angulaire sur les références pour le trépied en bois

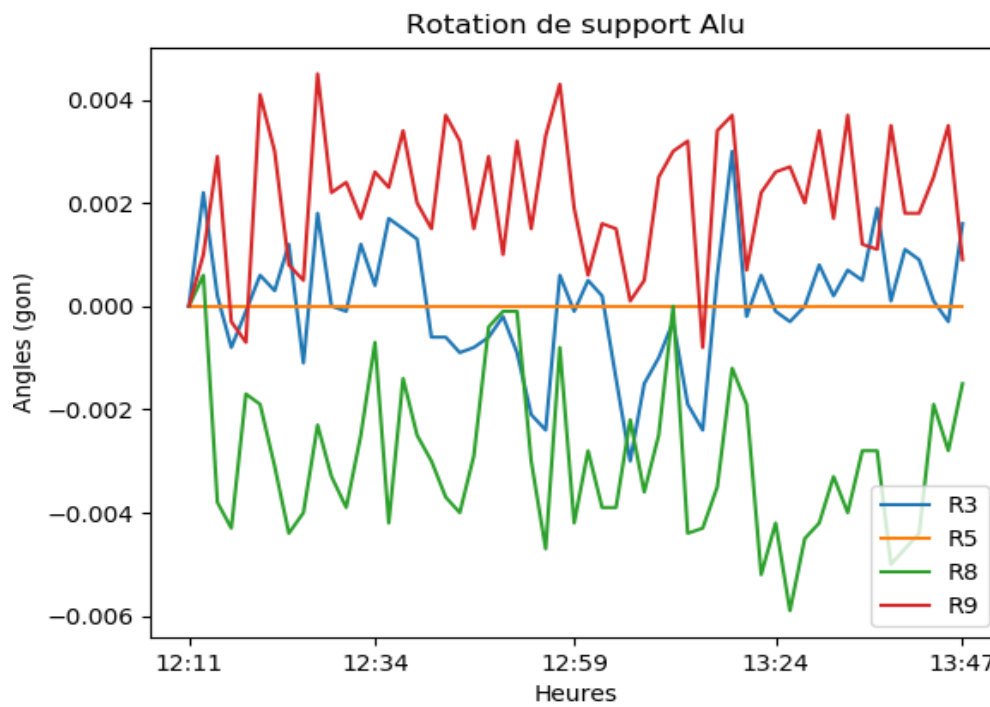


Figure IV.2 : Ecart de mesure angulaire sur les références pour le trépied en aluminium