

Projet de modélisation du Marégraphe de Marseille du 04/07/2022 au 22/07/2022

Rapport de stage



Table des matières

I.	Introduction au projet	2
1.	Le Marégraphe	2
2.	L'AAMM (Association des Amis du Marégraphe de Marseille) et leurs attentes	2
3.	Livrables.....	2
II.	Géoréférencement du site	2
1.	Réflexion terrain et placement des cibles	2
2.	Acquisitions GNSS.....	4
3.	Traitement des données	4
4.	Choix des coordonnées utilisées pour géoréférencer.....	6
III.	Photogrammétrie aéroportée	6
1.	Cibles B&W	6
2.	Prises de vues	7
3.	Traitement sur Metashape des prises de vues aériennes.....	9
IV.	Laser Scanner.....	15
1.	Matériel utilisé	15
2.	Placement des stations.....	15
3.	Traitement des données laser	16
V.	Annexes	17

I. Introduction au projet

1. Le Marégraphe

Le Marégraphe de Marseille a été construit en 1884. Depuis sa construction, il observe le niveau de la mer, afin de fixer l'origine du réseau de nivellement de la France continentale. Si les acquisitions du marégraphe ont commencé en 1885, c'est seulement après 12 ans de mesures (c'est à dire en 1897), que le réseau a été fixé pour la première fois. Depuis, les mesures sont reprises chaque année et le réseau est mis à jour. L'observatoire est de nos jours un élément (N°205) du réseau mondial permanent d'observatoires du niveau de la mer GLOSS. Depuis 1998, le système de flotteur fonctionne en même temps que le système numérique, mesurant le niveau de la mer par ultrason d'abord, puis par Laser depuis 2009. Il fait également partie des monuments historiques depuis 2002.

2. L'AAMM (Association des Ami-e-s du Marégraphe de Marseille) et leurs attentes

L'association des amis du Marégraphe de Marseille, créée en 2021, a pour but de réunir des personnes souhaitant agir pour la mise en valeur, la promotion et le renom du monument. C'est dans ce contexte que l'association a contacté l'IGN pour la réalisation d'un modèle 3D des bâtiments du marégraphe, qui servira à réaliser un outil de visite virtuelle, permettant à plus de personnes de découvrir ce dernier, ouvert seulement pendant les journées de patrimoine.

3. Livrables

L'AAMM nous ont demandé un modèle 3D. Nous avons donc choisi de produire un nuage de point (Point Cloud) de l'intérieur et de l'extérieur, un maillage (Mesh) de l'extérieur, un plan de coupe inspiré des schémas originaux et une visite virtuelle.

II. Géoréférencement du site

1. Réflexion terrain et placement des cibles

Une des premières problématiques à laquelle nous avons pensé concerne le géoréférencement des bâtiments du site. En effet pour créer notre livrable, il nous fallait modéliser à la fois l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, ainsi que la cour autour de celui-ci. Pour modéliser l'extérieur et la cour, nous avons choisi de faire appel à un droniste, qui a pris des photos aériennes sous tous les angles afin d'obtenir un modèle par Photogrammétrie. Pour la cour, nous avons consolidé le travail du drone avec des acquisitions laser. Quant à l'intérieur du bâtiment, il a été scanné à l'aide du capteur Laser, par le biais de plusieurs stations afin de capturer un maximum de points, même dans les endroits les plus difficiles d'accès. Afin de combiner ces différentes acquisitions (laser et photographiques), nous avons mis en place un réseau de points de calages (ou *Ground Control Point* : points de coordonnées connues repérables dans les données photogrammétriques et lasergrammétriques) pour que les différents nuages de points obtenus soient cohérents dans l'espace.



Figure 1 : Schéma de l'emplacement des cibles photogrammétriques sur le site du marégraphe

Ces points de calages ont été matérialisés avec des cibles photogrammétriques de type damier 2*2 (*Black & White chessboard*) » de 25 cm de côté. Celles-ci doivent être placées de telle sorte que les photos du drone capturent à la fois les cibles et le bâtiment (cf Figure 1). Les cibles placées dans la cour intérieure doivent aussi être visibles par le laser lorsqu'il effectue des acquisitions dans le bâtiment. C'est pour cela que nous les avons placées devant les ouvertures (portes et fenêtres) comme représenté dans la Figure 2. De plus, nous avons surélevé les cibles B&W sur des trépieds centrés au-dessus des cibles collées au sol, afin de les matérialiser à hauteur définie pour que les acquisitions laser de l'intérieur du bâtiment puissent capter les cibles dont les coordonnées sont connues.



Figure 2 : Représentation de l'emplacement des GCP's dans la cour intérieure du Marégraphe

2. Acquisitions GNSS

Une fois les cibles installées, nous comptons nous en servir comme points de repère et ainsi en déduire les coordonnées. Nous avons donc effectué des relevés GNSS sur toutes ces cibles à l'aide d'une antenne Spectra. Nous avons d'abord stationné environ 15 min l'ensemble des points que nous voulions déterminer, c'est à dire l'ensemble des cibles fixées au sol. En effet, nous avons d'abord choisi d'effectuer des acquisitions de courtes durées pour rapidement balayer l'ensemble des cibles qui étaient situées dans un espace public et qui étaient donc susceptibles d'être dégradées ou déplacées. Cela a été le cas pour deux d'entre elles, mais nous avons dessiné l'ensemble des cibles à la craie sur le sol pour retrouver leur emplacement au centimètre près. De plus, pour la précision que nous recherchons dans ce type de projet (centimétrique), des stations de 15 min dans un espace découvert, sans masques, peuvent suffire à obtenir de bons résultats avec des écarts-types raisonnables.

Après l'acquisition de l'ensemble des points pendant 15 min chacun, nous avons contrôlé sur le logiciel RTK-Lib les précisions et écarts-types, et nous avons remarqué que quelques points présentaient des écarts-type supérieur à notre tolérance (5 cm). Il s'agissait pour la plupart de points proches d'un mur et donc présentant un masque. Nous avons donc réalisé une nouvelle série de mesures durant une heure sur les points qui présentaient un masque important.

3. Traitement des données

Une fois l'ensemble des acquisitions effectuées, nous sommes passés au traitement approfondi des données. Nous avons utilisé la méthode différentielle en statique. Ainsi, nous avons eu besoin

des données d'une autre station fixe de référence. Nous avons utilisé celles de la station MARS situé sur le toit du marégraphe, c'est-à-dire sur le lieu du chantier. Ces données sont disponibles en libre-service sur le site de l'IGN, nous les avons donc récupérées sur la durée pendant laquelle nous avons effectué les acquisitions.

De plus, afin d'augmenter nos chances d'avoir de bonnes coordonnées, nous avons décidé d'utiliser trois moyens différents pour obtenir les coordonnées de celles que nous avons pu comparer. Tout d'abord, nous avons utilisé le logiciel rtkLib. Pour rendre les données de notre antenne utilisable pour le calcul, il a fallu les convertir en fichier RINEX à l'aide d'un simple convertisseur. Après lancement des calculs, nous obtenions un rapport détaillé des calculs. (*c.f. rapport rtkLib [1]*)

Nous obtenons une liste de coordonnées calculées toutes les secondes pendant la durée d'acquisition, avec l'indice "Q=1" lorsque l'antenne était "fixed" ou "Q=2" lorsque l'antenne était en "float". Si l'indice dépasse ces valeurs, alors cela veut dire que le logiciel n'arrive pas à effectuer le différentiel. Nous avons ensuite effectué la moyenne et l'écart-type de toutes ces coordonnées avec "Q=1" afin d'en avoir une seule.

Dans un second temps, nous avons utilisé le service RGP de l'IGN qui, à partir de l'envoi d'un fichier Rinex par mail, nous renvoie le rapport complet avec les coordonnées et les écart-type souhaités. Enfin, nous avons utilisé le logiciel constructeur Leica Infinity (*c.f. rapports service RGP [2] et Leica Infinity [3]*).

Après avoir calculé les coordonnées de chaque point par ces trois façons différentes, nous avons dû les convertir en Lambert 93, c'est à dire en E/N/H. Nous avons ensuite comparé ces trois coordonnées. Nous avons remarqué que les écart-types des acquisitions de 15 min étaient tous très satisfaisant (5 cm). Cependant, sur un court laps de temps, les satellites ont moins le temps de se déplacer et donc enregistrent des coordonnées similaires dans la période d'acquisition, ainsi les écart-types donnés par le logiciel de post-traitement GNSS ne sont pas vraiment significatifs. Nous avons donc utilisé nos différents calculs pour déterminer les points qui étaient mauvais. Nous avons remarqué que les différences entre les résultats concernant le point situé dans la cour intérieur étaient trop grosses. Même l'acquisition d'une heure de ce point met en exergue des écart-types bien trop élevés. En effet, ce point présente la façade du marégraphe au sud et un autre mur au nord, ainsi le masque y est trop élevé. Celui-ci est donc inutilisable.

Concernant les autres points, ceux qui ont fait l'objet d'une acquisition pendant une heure étaient satisfaisants. Les autres, ceux qui n'ont pas nécessité une deuxième acquisition, n'avaient aucun masque et captaient tous les satellites présents dans le ciel à ce moment.

Finalement, nous avons gardé les coordonnées calculées par le logiciel Leica Infinity car les écart-types étaient meilleurs. L'hypothèse que nous pouvons émettre est que l'algorithme de ce logiciel traite mieux la très courte distance entre nos stations et la station MARS que l'algorithme du service de l'IGN et de rtkLib.

4. Choix des coordonnées utilisées pour géoréférencer

Une fois les coordonnées de toutes nos cibles photogrammétriques calculées (sauf le point devant la porte d'entrée), nous avons pu les inclure dans les nuages de points photogrammétriques et laser. Quant à la cible dont les coordonnées manquaient, nous les avons re-déterminées indirectement par intersection spatiale photogrammétrique en utilisant les orientations internes et externes calculés dans la section III. Bien que cette solution ne soit pas la meilleure, elle reste la plus efficace pour obtenir une précision centimétrique pour ce point.

III. Photogrammétrie aéroportée

La prise de vues aérienne du site du Marégraphe de Marseille a été réalisée par drone. L'utilisation de ce moyen technique moderne permet d'acquérir des photographies des différentes façades extérieures mais aussi des toits des bâtiments de manière simple (matériel léger, polyvalent) et rapide. Le vol et les acquisitions ont été effectués par un droniste, Monsieur Rémi Bruno (Figure 3).



Figure 3 : Acquisition de photographies par drone

1. Cibles B&W

Comme vu précédemment, des cibles B&W ont été disposées sur le Marégraphe. Dans un premier temps certains points sont utilisés en tant que points de calage (*Ground Control Points*) et servent à géoréférencer le modèle. Les autres points connus en coordonnées, mais non utilisés dans le calcul sont appelés points de contrôle, et servent à vérifier la validité du modèle (*Check Point*).

Pour la nomenclature des points, se référer à la Figure §II.1.

2. Prises de vues

Le drone utilisé pour la prise de vue aérienne est un drone DJI Mavic Air 2. Ses caractéristiques techniques sont jointes (extraits du manuel utilisateur).

Les conditions de vol étaient bonnes pour la stabilité du drone (peu de vent, il faut prendre en compte ce paramètre en bord de mer, les jours suivant le mistral aurait empêché tout vol). Le fort ensoleillement rend inhomogène la radiométrie sur les différentes façades.

L'extérieur de l'enceinte du Marégraphe est perturbé par les passages des véhicules et piétons. Nous avons surveillé la circulation des piétons et demandé à ceux-ci de ne pas interférer avec la prise de photographies en leur demandant de traverser la chaussée.

La caméra du drone est composée d'un capteur CMOS 1/2 et d'un objectif dont le champ angulaire (*Field Of View*) est de 84° et la focale de 4.5mm. Lors du vol le réglage était en prise de vue unique à 12MP de résolution (4000x3000 px) pour un enregistrement plus rapide des photos.

Système de détection	
Avant	Distance de mesure de précision : 0,35 à 22 m Portée de détection : 0,35 à 44 m Vitesse effective de détection : ± 12 m/s FOV : 71° (à l'horizontale), 56° (à la verticale)
Arrière	Distance de mesure de précision : 0,37 à 23,6 m Portée de détection : 0,37 à 47,2 m Vitesse effective de détection : ± 12 m/s FOV : 44° (à l'horizontale), 57° (à la verticale)
Inférieur	Portée de mesure du capteur infrarouge : 0,1 à 8 m Portée du vol stationnaire : 0,5 à 30 m Portée du capteur infrarouge en vol stationnaire : 0,5 à 60 m
Conditions d'utilisation	Surfaces non réfléchissantes et discernables avec une réflexion diffuse > 20 % ; éclairage adéquat > 15 lux
Caméra	
Capteur	CMOS 1/2 Pixels effectifs : 12/48 MP
Objectif	FOV : 84° Équivalent 35 mm : 24 mm Ouverture : f/2,8 Portée de mise au point : 1 m à l'infini
ISO	Vidéo : 100 – 6 400 Photo (12 MP) : 100 – 3 200 (Auto), 100 – 6 400 (Manuel) Photo (48 MP) : 100 – 1 600 (Auto), 100 – 3 200 (Manuel)
Vitesse d'obturation électronique	8 – 1/8000 s
Taille d'image maximale	48 MP : 8 000 x 6 000 12 MP : 4000 x 3000
Modes de photographie fixe	Prise de vue unique : 12 MP/48 MP Rafale : 12 MP, 3/5/7 clichés Bracketing d'exposition automatique (AEB) : 12 MP, 3/5 clichés à 0,7 EV Intervalle : 12 MP 2/3/5/7/10/15/20/30/60 seconds SmartPhoto : 12 MP Panorama HDR : Vertical (3 x 1) : 3 328 x 8 000 pixels (l x H) Large (3 x 3) : 8 000 x 6 144 pixels (l x H) Panorama 180° (3 x 7) : 8 192 x 3 500 pixels (l x H) Sphère (3 x 8 + 1) : 8 192 x 4 096 pixels (l x H)
Définition vidéo	4K Ultra HD : 3 840 x 2 160 24/25/30/48/50/60 ips 2,7K : 2 688 x 1 512 24/25/30/48/50/60 ips FHD : 1 920 x 1 080 24/25/30/48/50/60/120/240 ips 4K Ultra HD HDR : 3 840 x 2 160 24/25/30 ips 2,7K HDR : 2 688 x 1 512 24/25/30 ips FHD HDR : 1 920 x 1 080 24/25/30 ips
Débit binaire max.	120 Mbits/s
Fichier système pris en charge	FAT32 exFAT (recommandé)
Format de photo	JPEG/DNG (RAW)
Format de vidéo	MP4/MOV (H.264/MPEG-4 AVC, H.265/HEVC)

Figure 4 : Extrait de la documentation technique du DJI Mavic Air 2

Une résolution du modèle est alors estimable en fonction de la hauteur de vol. En supposant la hauteur de vol de l'ordre de grandeur de 20m on obtient une résolution de 7mm/px. Cela donne un ordre de grandeur de la résolution de notre modèle à venir.

3. Traitement sur Metashape des prises de vues aériennes

Le traitement des photographies s'est fait sur Metashape. La première étape (*Align Photos*) consiste à déterminer les points homologues (*Tie-Points*) entre chaque photographie comme illustré Figure 5 ainsi que la position relative des clichés. Cette première étape donne lieu à un rapport contenant les données d'acquisition et la calibration de la caméra entre autres, dont l'extrait de rapport est en annexe.



Figure 5 : Tie Points entre deux photos (bleu retenus, rouges non retenus)

Concernant la page Survey Data, on remarque que tous les Tie Points sont vus plus de 9 fois dans le modèle, le recouvrement est largement satisfaisant. De plus la résolution sol estimée par le logiciel est de 6.15 mm/px. On peut ainsi valider l'estimation faite précédemment de 7mm/px.

En revanche un problème a été soulevé concernant la modélisation de l'orientation interne de l'appareil photo (*Camera Calibration*) lors du premier calcul avec le format PNG et une déformation optique modélisée avec 3 paramètres. Les résidus images (agrégés sur une grille) sont présentés Figure 6.

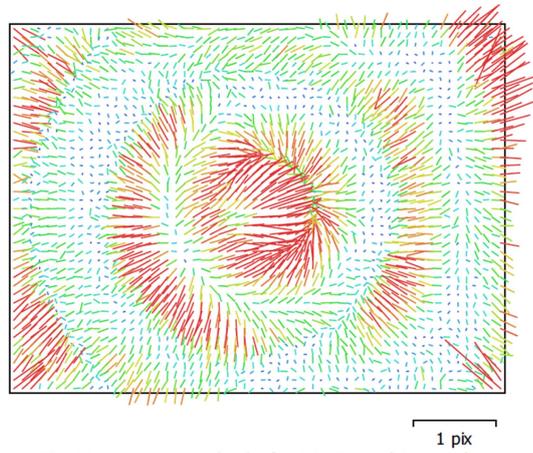
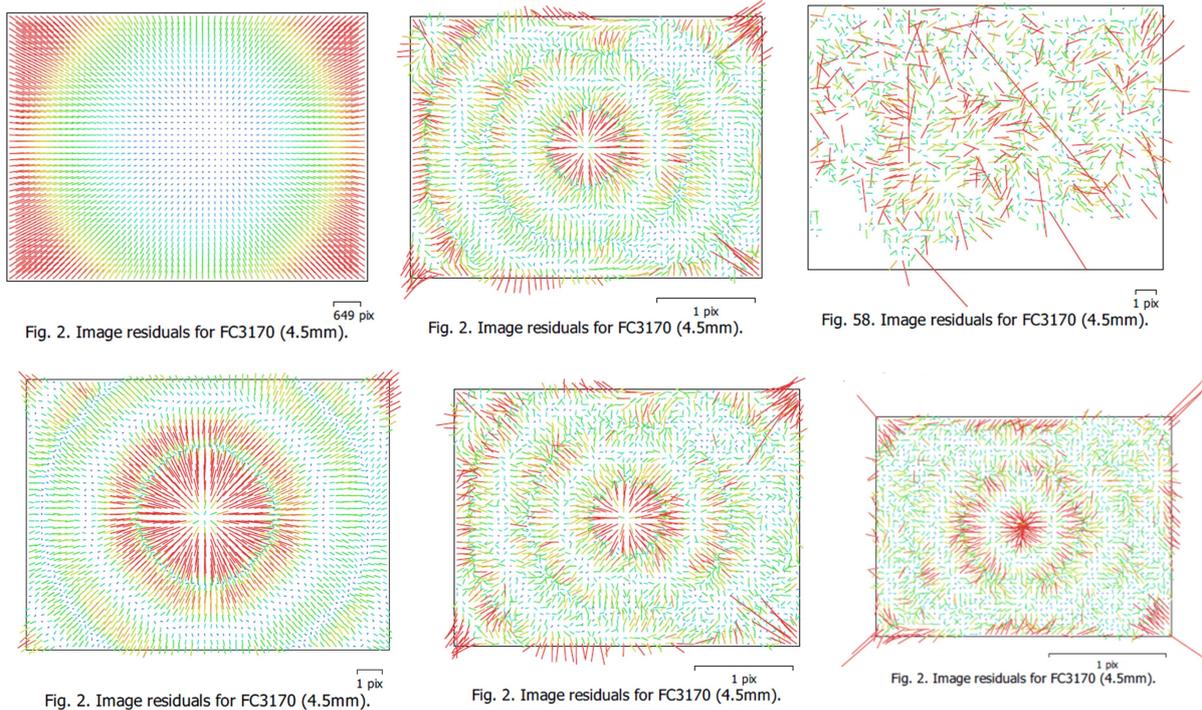


Fig. 2. Image residuals for FC3170 (4.5mm).

Figure 6 : Camera Calibration Résidus 3 paramètres PNG

On obtient des franges de déformations très marquées, de l'ordre du pixel. Une explication envisagée est alors que le système de caméra du drone applique une correction géométrique aux photos lors de leur enregistrement au format JPG. En effet ce drone est adapté pour faire des rendus photos/vidéos esthétiques avant tout. Si cette correction s'applique au centre de l'image (et pas le point principal) de manière automatique alors on obtient lors de la calibration optique sur Metashape ces franges de déformation par somme des deux rectifications (logiciel interne et traitement post-acquisition).

Une suite d'essais ont été réalisés pour déterminer la meilleure calibration possible. L'estimation peut être rendue photo par photo comme s'il s'agissait de caméras différentes. L'enregistrement des photos se fait au format JPG et DNG. La calibration sur le format DNG a été testée. Le nombre de paramètres du polynôme, modélisant la déformation optique, peut aussi être augmenté à 4 et il est possible d'ajouter des paramètres supplémentaires. L'objectif du drone étant à grand angle, on a tenté une estimation par FishEye (option dont les paramètres ne sont pas donnés).



Camera Calibration Résidus dans l'ordre – Fish-Eye ; HIGHres 4 paramètres ; Individuel ; 3 paramètres DNG ; MEDIUMres 4 paramètres ; 4 paramètres DNG

On remarque que l'option FishEye est mauvaise (déformation de plus de 649 pixels). Les photos traitées comme des caméras individuellement ont une déformation trop grande elles aussi. L'augmentation du nombre de paramètres permet d'obtenir un meilleur résultat en PNG comme en DNG. Le rendu colorimétrique étant plus agréable en PNG la correction choisie est celle à 4 paramètres (plus paramètres supplémentaires) au format PNG.

Ce choix fait nous avons réalisé deux modèles:

- un mesh de plus de 18 millions de faces réalisé à partir d'un nuage de point dense de 98 millions de points
- un mesh réalisé à partir des cartes de profondeurs (*depth maps*) de 5 millions de faces.

Ces deux méthodes ont été réalisées indépendamment. Pour la première le nuage de point a été nettoyé avant la création du mesh et texturé. Pour la seconde, le mesh est construit avec un filtre moyen sur les depth maps (certains points aberrants sont ainsi inutilisés) puis texturé. La méthode des depth maps consiste à calculer la profondeur d'un maximum de points dans l'image et attribuer une valeur à chaque point en fonction de celle-ci. Ainsi, avec les depth maps de chaque image

généérées, le logiciel peut ensuite calculer quel point est à quelle distance de chaque caméra, détectant alors les anomalies, pour créer un mesh (maillage de triangles entre points) plus fidèle à la réalité.

Le produit livré contient donc le second modèle : un mesh réalisé à partir des depth maps de 5 millions de faces. Le rendu graphique est de meilleure qualité que celui du nuage et sa structure moins complexe permet un affichage plus aisé sur logiciel.

Concernant la validité du modèle, l'objectif est d'obtenir les écarts les plus faibles possibles entre les coordonnées (connues par GNSS ici) des Check Points et celles obtenues pour ces points dans le modèle 3D géoréférencé voir §III.1..

Pour obtenir ces valeurs, il faut recalculer pour chaque combinaison voulue l'alignement des photos. Ce calcul peut itérer depuis la valeur finale du modèle de la combinaison précédente ou être recommencé dans une condition initiale indépendante de ce résultat. Nous avons testé les deux méthodes car la première nécessite moins de calcul ce qui permet de tester des combinaisons GCP/Checkpoint de façon plus rapide.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)	
<input type="checkbox"/>	1001	891157.857000	6245037.321000	10.915000	0.004/0.006/0.012	0.008333	14	0.604
<input type="checkbox"/>	1002	891139.715000	6245049.699000	11.543000	0.008/0.026	0.033112	10	0.522
<input type="checkbox"/>	1003	891132.060000	6245043.610000	10.320000	0.006/0.01/0.018	0.033533	71	0.236
<input type="checkbox"/>	1004	891129.917000	6245034.230000	6.880000	0.004/0.006/0.016	0.026469	20	0.361
<input type="checkbox"/>	1006	891157.401000	6245020.705000	1.435000	0.022/0.02/0.052	0.056558	102	0.308
<input type="checkbox"/>	1007	891156.280000	6245029.980000	5.900000	0.006/0.016	0.028424	10	0.393
<input type="checkbox"/>	1008	891140.300000	6245011.890000	2.640000	0.006/0.014	0.039071	3	0.508
<input checked="" type="checkbox"/>	2002	891152.860000	6245029.890000	6.710000	0.024/0.018/0.04	0.026639	11	0.667
<input checked="" type="checkbox"/>	2003	891151.870000	6245027.050000	6.840000	0.016/0.014/0.042	0.066564	9	0.755
<input checked="" type="checkbox"/>	2005	891148.560000	6245029.420000	12.710000	0.002/0.004/0.008	0.004221	26	0.634
<input checked="" type="checkbox"/>	2006	891151.170000	6245037.280000	10.710000	0.008/0.02	0.014513	13	0.633
Total Error								
Control points						0.036636		0.660
Check points						0.034896		0.339

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)	
<input type="checkbox"/>	1001	891157.857000	6245037.321000	10.915000	0.004/0.006/0.012	0.008351	14	0.695
<input type="checkbox"/>	1002	891139.715000	6245049.699000	11.543000	0.008/0.026	0.033129	10	0.602
<input type="checkbox"/>	1003	891132.060000	6245043.610000	10.320000	0.006/0.01/0.018	0.033717	71	0.284
<input type="checkbox"/>	1004	891129.917000	6245034.230000	6.880000	0.004/0.006/0.016	0.026087	20	0.388
<input type="checkbox"/>	1006	891157.401000	6245020.705000	1.435000	0.022/0.02/0.052	0.056575	102	0.346
<input type="checkbox"/>	1007	891156.280000	6245029.980000	5.900000	0.006/0.016	0.028478	10	0.401
<input type="checkbox"/>	1008	891140.300000	6245011.890000	2.640000	0.006/0.014	0.039002	3	0.537
<input checked="" type="checkbox"/>	2002	891152.860000	6245029.890000	6.710000	0.024/0.018/0.04	0.026558	11	0.663
<input checked="" type="checkbox"/>	2003	891151.870000	6245027.050000	6.840000	0.016/0.014/0.042	0.066503	9	0.755
<input checked="" type="checkbox"/>	2005	891148.560000	6245029.420000	12.710000	0.002/0.004/0.008	0.004217	26	0.630
<input checked="" type="checkbox"/>	2006	891151.170000	6245037.280000	10.710000	0.008/0.02	0.014490	13	0.634
Total Error								
Control points						0.036592		0.658
Check points						0.034882		0.383

Comparaison des résultats avec conditions initiales différentes

On remarque que la condition initiale du calcul impacte faiblement le résultat et est négligeable au vu de l'application (AN: 0.044mm)

Sur cet exemple les GCP sont les points à l'intérieur de l'enceinte du Marégraphe et les ControlPoints ceux à l'extérieur. Il est contre-intuitif d'obtenir une meilleure précision sur les bords non-fixés que sur l'intérieur fixé. En effet la propagation des erreurs en géométrie lors de l'extrapolation devrait être plus forte sur les bords. Ce résultat s'explique par l'incertitude des points de la cour intérieure qui présentent pour certains un masque GNSS, c'est-à-dire un mur ou une façade trop proche.

On peut tester la précision du modèle en mettant un point extérieur et un point intérieur à l'enceinte en Checkpoint pour contrôler la précision en plusieurs endroits.

Les résultats numériques obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ 1001	891157.857000	6245037.321000	10.915000	0.004/0.006/0.012	0.012896	14	0.604
✓ 1002	891139.715000	6245049.699000	11.543000	0.008/0.026	0.015507	10	0.522
✓ 1003	891132.060000	6245043.610000	10.320000	0.006/0.01/0.018	0.022948	71	0.237
✓ 1004	891129.917000	6245034.230000	6.880000	0.004/0.006/0.016	0.019457	20	0.363
✓ 1006	891157.401000	6245020.705000	1.435000	0.022/0.02/0.052	0.062655	102	0.308
✓ 1007	891156.280000	6245029.980000	5.900000	0.006/0.016	0.014404	10	0.398
1008	891140.300000	6245011.890000	2.640000	0.006/0.014	0.013903	3	0.508
✓ 2002	891152.860000	6245029.890000	6.710000	0.024/0.018/0.04	0.017723	11	0.667
✓ 2003	891151.870000	6245027.050000	6.840000	0.016/0.014/0.042	0.074192	9	0.755
✓ 2005	891148.560000	6245029.420000	12.710000	0.002/0.004/0.008	0.007222	26	0.635
✓ 2006	891151.170000	6245037.280000	10.710000	0.008/0.02	0.016507	13	0.633
Total Error							
Control points					0.034041		0.424
Check points					0.013903		0.508

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ 1001	891157.857000	6245037.321000	10.915000	0.004/0.006/0.012	0.003543	14	0.605
✓ 1002	891139.715000	6245049.699000	11.543000	0.008/0.026	0.011122	10	0.522
✓ 1003	891132.060000	6245043.610000	10.320000	0.006/0.01/0.018	0.023530	71	0.237
✓ 1004	891129.917000	6245034.230000	6.880000	0.004/0.006/0.016	0.011815	20	0.363
✓ 1006	891157.401000	6245020.705000	1.435000	0.022/0.02/0.052	0.058457	102	0.308
✓ 1007	891156.280000	6245029.980000	5.900000	0.006/0.016	0.017612	10	0.396
✓ 1008	891140.300000	6245011.890000	2.640000	0.006/0.014	0.002545	3	0.511
✓ 2002	891152.860000	6245029.890000	6.710000	0.024/0.018/0.04	0.016617	11	0.667
✓ 2003	891151.870000	6245027.050000	6.840000	0.016/0.014/0.042	0.071875	9	0.755
1005	891148.560000	6245029.420000	12.710000	0.002/0.004/0.008	0.014657	26	0.634
✓ 2006	891151.170000	6245037.280000	10.710000	0.008/0.02	0.011228	13	0.633
Total Error							
Control points					0.031830		0.398
Check points					0.014657		0.634

Contrôle de la précision du modèle avec 1008 et 2005 en CheckPoints

On remarque que la précision de ces Checkpoints est de 1.3 cm pour 1008 et 1.4 cm pour 2005. Plus l'ensemble des GCP contiennent de points, plus les Checkpoints sont précis.

De plus la redondance est suffisamment grande pour permettre une rigidité au modèle. En effet en réalisant des combinaisons différentes on trouve une précision toujours centimétrique (ex 0.036636m dans le cas ci-dessus).

L'ensemble des points peuvent être utilisés en tant que Ground Control Points au vu de la stabilité du modèle face à l'inter-échange des rôles de GCP et Check Point.

Total Error		
Control points	0.033741	0.425

On obtient une précision finale de 3.37 cm.

En supprimant les deux points ayant les plus grands résidus on pourrait obtenir des précisions de l'ordre du centimètre.

Total Error

Control points

0.015603

0.458

Cette amélioration aurait un coût en calcul élevé pour un gain limité de précision.

IV. Laser Scanner

Le drone est une solution adaptée pour l'extérieur, mais pour l'intérieur il faut utiliser une autre méthode. Nous aurions pu procéder encore une fois par photogrammétrie, avec des appareils photos, mais la solution du Laser nous semblait plus adaptée du fait de sa précision et de sa facilité à post-traiter.

1. Matériel utilisé

Nous avons utilisé le capteur Laser Trimble X7, qui est une station rotative sur trépied, balayant presque l'ensemble de la pièce, à l'exception de la zone en-dessous de lui. Pour chaque point, le faisceau Laser est réfléchi par une surface, puis revient vers la station, qui peut alors déterminer la distance à laquelle l'objet touché se trouve. On obtient ainsi un nuage de point en noir et blanc. Pour déterminer la valeur en niveau de gris de chaque point, l'appareil calcule l'intensité du rayon réfléchi. Plus la valeur est forte, plus le point est blanc. Cependant il faut encore coloriser le nuage de point ; pour cela, le Laser X7 prend également des photos, qu'il superpose au nuage de point, assignant ainsi une valeur en RGB à chacun.

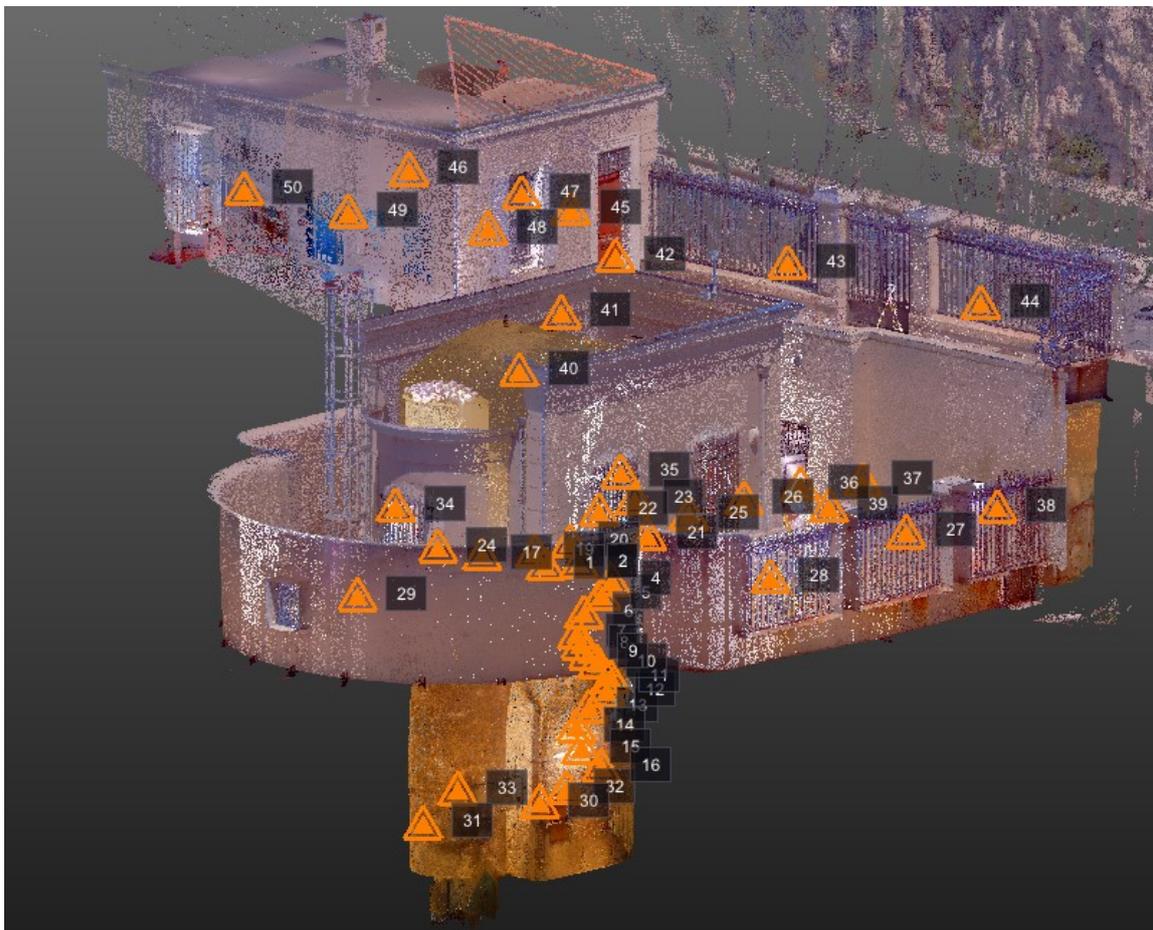
Le Laser ne peut pas, en une station, relever l'ensemble des points du marégraphe. Il faut donc effectuer plusieurs stations. Le Laser utilise alors un algorithme ICP (Iterative Closest Point) pour faire coïncider deux nuages de point successifs. A partir de deux nuages de points, l'algorithme va, à chaque itération, former des paires de points, calculer la transformation optimale (composée d'une translation et d'une rotation) pour faire correspondre ces points, puis l'appliquer. On parvient ainsi à faire correspondre les nuages de points deux à deux, et ils sont donc tous recalés les uns par rapport aux autres à la fin des acquisitions.

Le produit final est un gros nuage de points, un assemblage des différents nuages des stations, mais qui est placé dans un repère local.

2. Placement des stations

La principale difficulté des acquisitions laser était le placement de chaque station : Premièrement, l’algorithme ICP a besoin de points communs pour recaler les nuages deux à deux. Il faut donc placer chaque station pour que chacune puisse observer des surfaces déjà vues par une précédente station. Deuxièmement, il nous fallait recouvrir l’ensemble de l’intérieur du Marégraphe, ainsi que la cour intérieure, afin de recaler plus facilement les points pris par drone avec ceux acquis par laser. L’intérieur du marégraphe comprend l’intérieur de la maison du gardien, l’intérieur de l’ancien marégraphe (servant aujourd’hui de stockage), et l’intérieur du marégraphe actuel.

Cette dernière partie s’est avéré la plus compliquée, puisqu’il était difficile de recaler le Rez-de-chaussée du bâtiment avec le sous-sol abritant le puits. Nous avons donc dû placer de nombreuses stations dans l’escalier en colimaçon menant à cette dernière pièce, accumulant 14 stations dans l’escalier sur les 49 au total comme nous pouvons le voir sur l’illustration ci-dessous.



Modèle de l’intérieur du Marégraphe avec les stations laser effectuées

3. Traitement des données laser

Une fois le nuage final obtenu, il reste deux choses à faire : Le géoréférencer et le nettoyer. Pour le géoréférencement, nous avons créé un fichier CSV contenant les coordonnées des points relevés projetés en Lambert 93, nous l’avons intégré dans le logiciel de traitement, puis nous avons isolé les cibles Black & White dans les nuages de point pour déterminer leur centre. On sélectionne ensuite le point au centre de la cible (Avec une précision millimétrique au vu de notre résolution d’un point

tous les 2.5 mm à 5 m), et on lui attribue des coordonnées et un nom. Le logiciel utilise ensuite un algorithme de moindres carrés pour amortir les erreurs GNSS et laser. Après avoir géoréférencé la plupart des points, tout le nuage était géoréférencé avec une précision de 17.39 mm sur la plus mauvaise cible, et de 4.63 mm sur la plus précise, avec une erreur moyenne de 9.22 mm, ce qui est largement acceptable pour une production photogrammétrique de cette taille.

Après avoir géoréférencé le nuage de points, il a fallu le nettoyer. En effet, dans ceux-ci, on pouvait apercevoir des silhouettes, les cibles, et les trépieds portant ces cibles. Il y avait également du bruit sur certains nuages, dû aux oiseaux qui passaient. Il fallait également retirer les points de l'intérieur vus depuis l'extérieur et inversement, qui étaient mal colorisés à cause de la balance des blancs de l'appareil. Une fois ces points retirés, nous avons pu réaliser la visite virtuelle et exporter le nuage propre et géoréférencé afin de le combiner avec le modèle 3D obtenu par photogrammétrie aérienne.

V. Annexes

```

6 % obs start : 2022/07/08 10:50:50.0 GPST (week2217 471050.0s)
7 % obs end   : 2022/07/08 11:55:15.0 GPST (week2217 474915.0s)
8 % pos mode  : Static
9 % freqs     : L1+L2/E5b
10 % solution : Combined-Phase Reset
11 % elev mask : 15.0 deg
12 % dynamics : on
13 % tidecorr  : off
14 % ionos opt : Broadcast
15 % tropo opt : Saastamoinen
16 % ephemeris : Broadcast
17 % navi sys  : GPS GLONASS Galileo
18 % amb res   : Fix and Hold
19 % amb glo   : Fix and Hold
20 % val thres : 3.0
21 % antennal : SPP91564_2      NONE ( 0.0000 0.0000 1.5660)
22 % antenna2 : TRMS7971.00    NONE ( 0.0000 0.0000 0.0000)
23 % ref pos   : 4630532.9950   433946.0470  4350142.4780
24 %
25 % (x/y/z-ecef=WGS84,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
26 % GPST      x-ecef(m)      y-ecef(m)      z-ecef(m)      Q ns  sdx(m)  sdy(m)  sdz(m)  ε
27 2022/07/08 10:50:50.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
28 2022/07/08 10:50:51.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
29 2022/07/08 10:50:52.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
30 2022/07/08 10:50:53.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
31 2022/07/08 10:50:54.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
32 2022/07/08 10:50:55.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
33 2022/07/08 10:50:56.000 4630530.0458 433942.7151 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
34 2022/07/08 10:50:57.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
35 2022/07/08 10:50:58.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
36 2022/07/08 10:50:59.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0816 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
37 2022/07/08 10:51:00.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
38 2022/07/08 10:51:01.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
39 2022/07/08 10:51:02.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
40 2022/07/08 10:51:03.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
41 2022/07/08 10:51:04.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
42 2022/07/08 10:51:05.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
43 2022/07/08 10:51:06.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0815 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
44 2022/07/08 10:51:07.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0814 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
45 2022/07/08 10:51:08.000 4630530.0458 433942.7150 4350137.0814 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
46 2022/07/08 10:51:09.000 4630530.0458 433942.7149 4350137.0814 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
47 2022/07/08 10:51:10.000 4630530.0458 433942.7149 4350137.0814 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
48 2022/07/08 10:51:11.000 4630530.0458 433942.7149 4350137.0813 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
49 2022/07/08 10:51:12.000 4630530.0457 433942.7149 4350137.0813 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
50 2022/07/08 10:51:13.000 4630530.0457 433942.7149 4350137.0813 1 8 0.0008 0.0002 0.0005 -
51 2022/07/08 10:51:14.000 4630530.0546 433942.7147 4350137.0840 1 9 0.0007 0.0002 0.0005 -
52 2022/07/08 10:51:15.000 4630530.0545 433942.7147 4350137.0839 1 9 0.0007 0.0002 0.0005 -
53 2022/07/08 10:51:16.000 4630530.0545 433942.7147 4350137.0839 1 9 0.0007 0.0002 0.0005 -

```

[1] Extrait de rapport GNSS avec le logiciel rtkLib

===== RGF93 =====

POSITION RGF93 EPOQUE 2022.510 (06/07/22) :

1003 99999S999

X: 4630520.3060 Y: 433928.2792 Z: 4350153.9782

POSITION RGF93 COORDONNEES GEOGRAPHIQUES :

1003 99999S999

LONGITUDE 5.353580417 ° LATITUDE 43.278930447 ° HELL 59.2696

E 005 21 12.889503 N 43 16 44.149608 59.2696

LAMBERT-93 : E = 891132.047 m N = 6245043.608 m Alt (IGN69 via RAF18b) = 10.357 m

CC42 : E = 1891050.110 m N = 1344696.435 m

CC43 : E = 1891003.775 m N = 2233661.112 m

CC44 : E = 1891015.683 m N = 3122615.723 m

EXACTITUDE ESTIMEE (2*SIGMA) :

 1003 E_N : 27.0 mm E_E : 29.2 mm E_H : 48.3 mm

[2] Exemple de rapport GNSS avec le service RGP

	Définir comme référence - MARS	Définir comme mobile - 1007	
Classe du point:	RTK navigué	PT Fixé	
Latitude WGS84:	43° 16' 43,56" N	43° 16' 43,69" N	Est:
Longitude WGS84:	5° 21' 13,62" E	5° 21' 13,95" E	Nord:
Hauteur ellipsoïdale WGS84:	61,7902 m	54,8110 m	Altitude ortho:
X WGS84 Cartésien:	4 630 532,9950 m	4 630 524,6397 m	
Y WGS84 Cartésien:	433 946,0470 m	433 952,5928 m	
Z WGS84 Cartésien:	4 350 142,4780 m	4 350 140,4834 m	

Vecteur et Qualité de la ligne de base - WGS84

ΔLatitude:	0° 00' 00,12"	ET ΔLatitude:	0,0003 m
ΔLongitude:	0° 00' 00,32"	ET ΔLongitude:	0,0003 m
Δ Altitude:	-6,9791 m	ET Δ Altitude:	0,0008 m
ΔX:	-8,3553 m	ET ΔX:	0,0007 m
ΔY:	6,5458 m	ET ΔY:	0,0003 m
ΔZ:	-1,9946 m	ET ΔZ:	0,0005 m
Dist. pente:	10,7999 m	ET Dist. pente:	0,0006 m

[3] Extrait de rapport GNSS avec le logiciel Leica Infinity

Survey Data

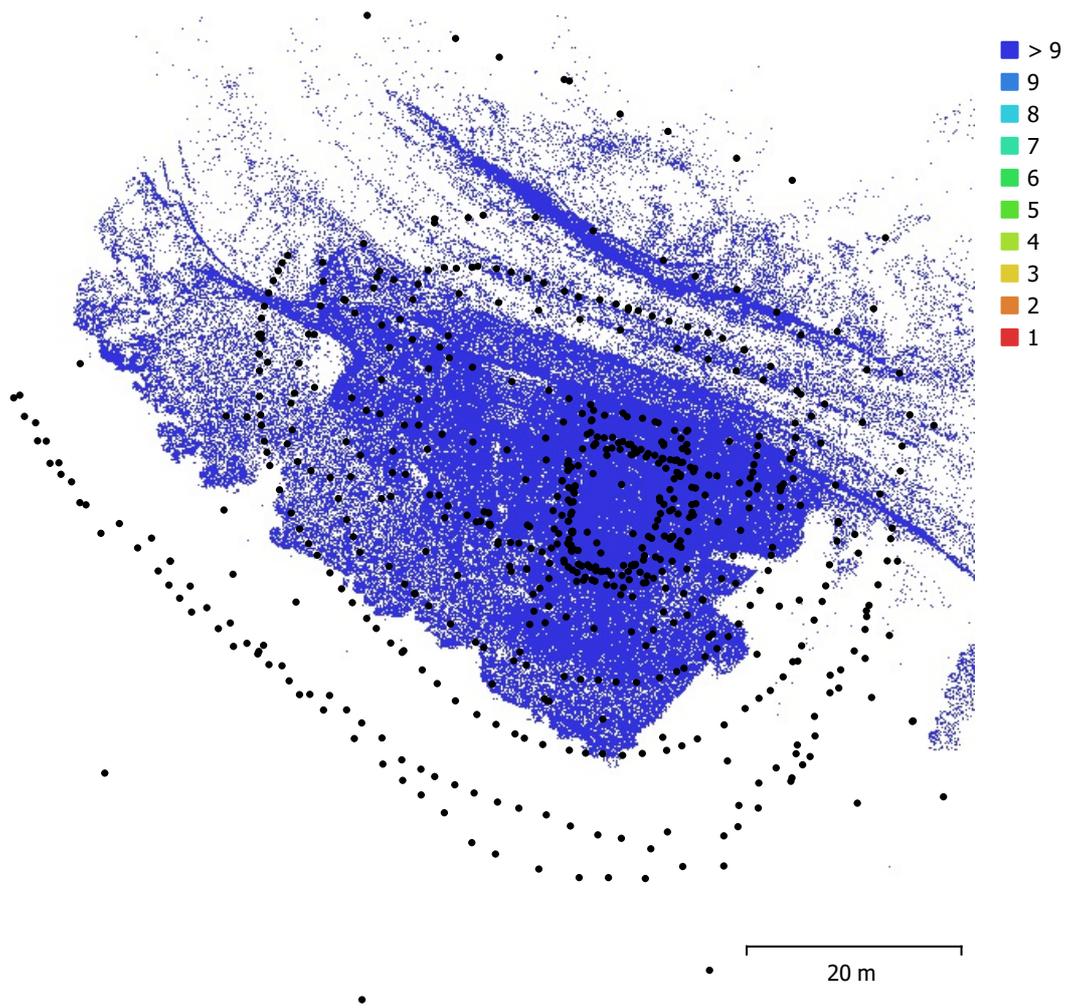


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	632	Camera stations:	626
Flying altitude:	18.3 m	Tie points:	388,071
Ground resolution:	6.15 mm/pix	Projections:	1,458,200
Coverage area:	1.83e+03 m ²	Reprojection error:	1.16 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC3170 (4.5mm)	4000 x 3000	4.5 mm	1.62 x 1.62 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

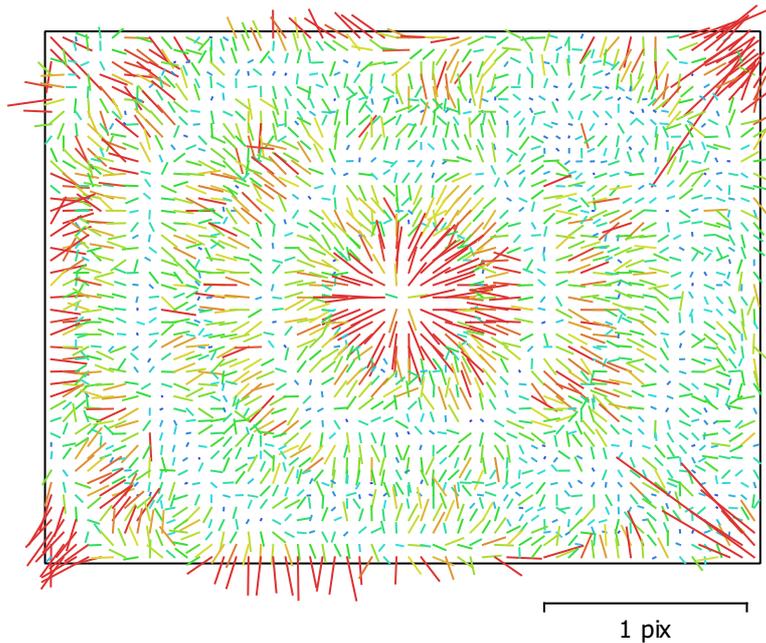


Fig. 2. Image residuals for FC3170 (4.5mm).

FC3170 (4.5mm)

632 images

Type
Frame

Resolution
4000 x 3000

Focal Length
4.5 mm

Pixel Size
1.62 x 1.62 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	2969.88	0.75	1.00	0.02	0.02	-0.22	0.01	-1.00	0.98	-0.96	0.94	0.04	0.02
Cx	-19.1657	0.1		1.00	-0.01	-0.08	0.05	-0.02	0.02	-0.01	0.00	0.97	-0.01
Cy	5.11937	0.11			1.00	0.00	-0.11	-0.03	0.03	-0.04	0.04	-0.01	0.96
B1	-0.312856	0.023				1.00	-0.01	0.23	-0.24	0.24	-0.23	-0.10	0.00
B2	0.914973	0.017					1.00	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.03	-0.12
K1	-0.107049	0.0022						1.00	-1.00	0.98	-0.96	-0.04	-0.02
K2	0.388277	0.0071							1.00	-1.00	0.98	0.03	0.03
K3	-0.465127	0.01								1.00	-1.00	-0.02	-0.03
K4	0.138244	0.0053									1.00	0.02	0.04
P1	-0.0012255	1.8e-05										1.00	-0.01
P2	0.000320579	2e-05											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.