

Rapport de Métrologie sur la Structure Hexagonale du Laboratoire Navier

Mastère spécialisé en Photogrammétrie,
Positionnement et Mesure de Déformations (PPMD)

Mars-Avril 2021

Etudiants :

Julien Barnéoud, Boubacar Kader Aba Agi, Elie-Alban Lescout,
Walaa Al Omeiri, Cédric Tabue Wafo, Alessandro Zacchera

Encadrants :

Emmanuel Clédat, Jean-Pierre Papelard, Franck Tertre

Table des matières

1	Introduction	2
2	Protocole de déformation de la structure	3
3	Techniques employées	4
3.1	Topométrie	4
3.1.1	Mesures	4
3.1.2	Traitements	5
3.2	Laser	5
3.3	Photogrammétrie	6
3.3.1	Protocole	6
3.3.2	Traitements	7
4	Comparaison inter-techniques	10
4.1	Topométrie vs LASER	10
4.2	Photogrammétrie	11
5	Résultats	13
6	Conclusion	16
7	Annexes	17

1 Introduction

Par le biais d'échanges entre Franck Tertre, Responsable Pédagogique et Enseignant à l'ENSG, et Cyril Douthe, Maître de Conférence à l'ENPC, une collaboration a vu le jour entre ces deux établissements, sous la forme d'un projet de métrologie proposé aux élèves du Master PPMD. Ce dernier a pour objectif de fournir des résultats utiles pour la recherche effectuée au Laboratoire Navier.

Une structure en bois composée de cellules hexagonales irrégulières a été installée à l'arrière du laboratoire Navier, dans le bâtiment Coriolis. Elle est visible en figure 1.

C'est cette structure que nous avons étudiée, par trois techniques de métrologie complémentaires : la topométrie, le scanner LASER (ou LiDAR) et la photogrammétrie. Une description détaillée de ces techniques est lisible à la section 3



Figure 1: Vue latérale de la structure étudiée.

2 Protocole de déformation de la structure

L'objectif de cette campagne de métrologie était donc d'étudier comment la structure réagissait à un chargement progressif, par des mesures à différents états.

Concrètement, des poubelles étaient accrochées à cette structure via des sangles, à des nœud spécifiques (voir figure 2) puis progressivement remplies d'eau avant chaque état.

Le détail du chargement est précisé dans la table 1. A l'état initial (0), les poubelles sont vides. Puis elles sont progressivement chargées jusqu'à subir le poids d'une masse maximale de 300 kg.

Etat	Horaire	Nœud A44 [kg]	Nœud B52 [kg]	Nœud C47 [kg]	Nœud [kg]	D	Nœud EPL1 [kg]
(initial) 0	–	0	0	0	0		0
1	14:20	10	10	10	10		10
2	14:45	30	30	10	10		10
3	15:15	30	30	30	30		30
4	15:35	60	60	30	30		30
5	16:15	60	60	60	60		60
6	16:50	30	30	30	30		30
7	17:15	0	0	0	0		0

Table 1: Chargement de la structure à chaque nœud et pour chaque état



Figure 2: Poubelles pour le chargement de la structure



Figure 3: Un des mini-prismes installés sur les nœud de la structure

3 Techniques employées

3.1 Topométrie

3.1.1 Mesures

Les mesures de topométrie étaient effectuées à l'aide d'un tachéomètre. Il s'agit d'un instrument capable de faire des mesures d'angles et de distance très précises (0.15 mgon angulairement et 1 mm en distance). Placé sur un pied lourd -rendant l'instrument très stable- il visait des mini-prismes judicieusement vissés à proximité des nœuds de la structure. Les mesures ont été faites de manière automatisées. La position initiale des prismes était enregistrée dans le tachéomètre motorisé, de sorte qu'il puisse reproduire la séquence de mesures à chaque état. Cette méthode automatisée présente deux avantages notables :

- l'utilisateur ne se trouve pas à proximité de l'instrument, évitant donc de le dérégler ("débuller");
- en mode automatique, le tachéomètre vise parfaitement le centre du prisme, s'affranchissant donc des erreurs d'appréciation de la part de l'expérimentateur.



Figure 4: Tachéomètre motorisé TCA2003 installé sur pied lourd

3.1.2 Traitements

Les traitements sont effectués à l'aide du logiciel Comp3D développé par l'IGN. Les positions des différents prismes et cibles y sont estimées par moindres carrés.

3.2 Laser

Le Lidar est un instrument permettant de faire des mesures à haute densité dans toutes les directions de l'espace tridimensionnel. Il produit un nuage de points représentant l'espace scanné.

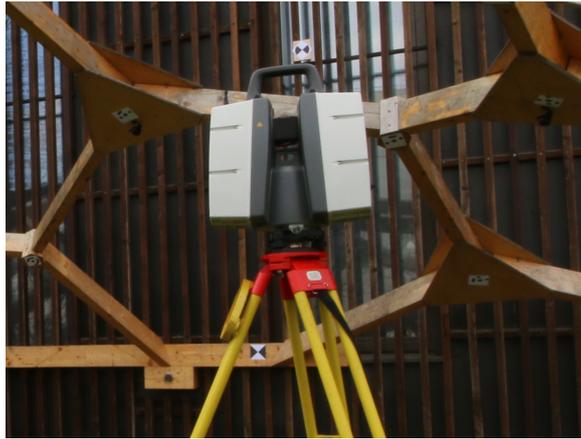


Figure 5: Laser Scanner P50 stationné sous la structure

Le processus de traitement des données est décrit à la figure 6. Après acquisition de données Lidar, une base de données a été créée sur le logiciel Cyclone.

- Dans une première étape, les données suivantes ont été exportées :
 - mesures des cibles au format `.xyz`,
 - l'ensemble du nuage de points au format `.ptx` (converti en format matriciel par la suite).
- Dans une deuxième phase, la réalisation du géoreférencement des images `.tiff` à l'aide de coordonnées issues du calcul topométrique en utilisant le programme PlyXGeoref.
- Ensuite, l'extraction des points homologues, suivi d'une vérification et suppression de points aberrants.
- Pour finir, la génération des vecteurs de déplacement et la mise en forme pour l'affichage dans Potree.

Les étapes de géoreférencement, d'extraction et génération ont été réalisées avec les programmes développés par Jean-Pierre Papelard.

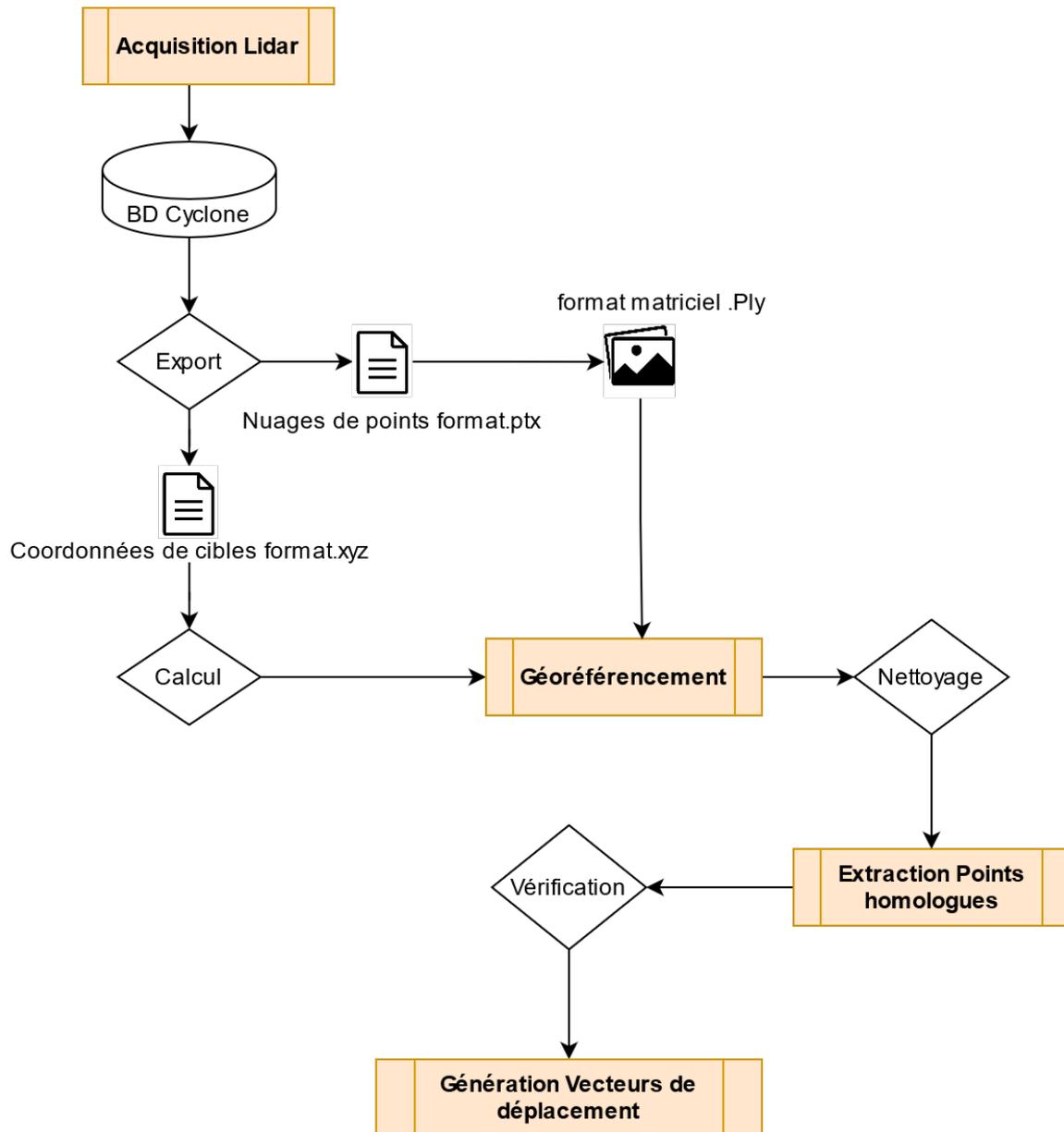


Figure 6: Processus de traitement des données laser

3.3 Photogrammétrie

3.3.1 Protocole

La photogrammétrie permet de déterminer des coordonnées 3D de points dans l'espace, à partir de leurs positions dans des images. Pour obtenir de telles coordonnées terrains, les points photographiés doivent être visibles dans au moins deux images (couple stéréoscopique et géométrie épipolaire).

Nous disposons de trois appareils photographiques. Avant de débiter les mesures sur la structure, il est nécessaire de les calibrer pour avoir les paramètres intrinsèques :

- distance focale f ,
- point principal pp ,
- distorsion

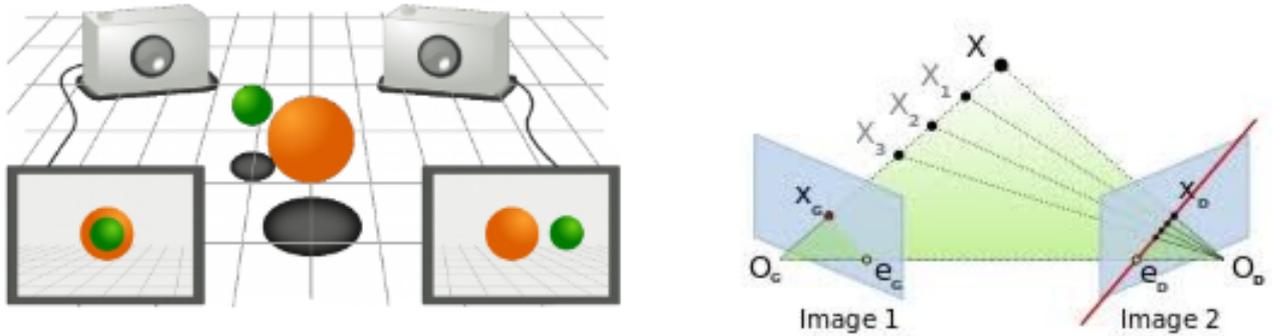


Figure 7: La géométrie épipolaire : un point terrain est vu dans plusieurs images. *Source image : Wikipédia*

Pour réaliser cette calibration, de nombreuses photos de la structure sont faites par l'utilisateur. Elles permettront en plus de pouvoir reconstruire un modèle 3D global de la structure.

Pour évaluer les déplacements de la structure avec la charge, nous plaçons les trois appareils le long de la structure. Chacun voit la scène d'un point de vue différent tout en assurant un maximum de recouvrement entre les images.

Une fois installés sur des trépieds, ils ne doivent absolument pas bouger ! Lors des déplacements successifs de la structure, nous allons en effet déterminer les coordonnées de points caractéristiques de la structure, matérialisés par des cibles. Elles ont été disposées de manière régulière sur les noeuds de la structure pour mesurer l'affaissement lors des différents états. Pour faciliter la reconnaissance des points, nous avons d'ailleurs utiliser des cibles de type *Photoscan*, agissant comme un code-barre et détectées de manière automatique par le logiciel de traitement Metashape.

Une fois le structure chargée pour un nouvel état, il suffit simplement d'appuyer sur le bouton pour prendre la photo *sans rien toucher d'autre* . Nous avons donc trois photos pour chaque état. En post-traitement il suffira de déterminer les coordonnées 3D de nos points caractéristiques (cibles) à chaque fois à partir des trois images et de comparer les écarts entre les coordonnées d'un même point pour quantifier le déplacement de la structure.



Figure 8: Les trois images (ie les trois points de vue) de la structure prises pour l'état 1

3.3.2 Traitements

Les traitements photogrammétriques ont été réalisés dans Agisoft Metashape.

Les nombreuses images la structures ont été traitées pour obtenir la calibration des caméras.

Nous avons 3 caméras à disposition :

- Canon 70D
- Canon Mark II
- Canon Mark III (objectif fisheye)

Les points homologues sont déterminés avec les calibrations des caméras. Nous chargeons ensuite les trois photos pour chaque état (une par appareil).

Comme décrit plus haut, l'utilisation de cibles type *Photoscan* devait rendre plus simple, robuste (et automatique) la détection des points caractéristiques sur nos photos. Ceci n'a pas vraiment été le cas (objectif fisheye apparemment trop déformant, les deux autres appareils sur le côté voyaient les cibles avec trop de devers pour reconnaître le code-barre). Nous avons donc sélectionné ces points manuellement, en passant dans le mode Stéréoscopique de Metashape. Ce mode consiste à visualiser le recouvrement de deux images. Il est alors possible de cliquer les points par couple stéréoscopique.



Figure 9: Vision stéréoscopique d'un couple d'image. Il faut superposer au mieux les deux cibles pour pouvoir cliquer le point 17

Il est alors possible de déterminer les coordonnées sur plusieurs couples (ex: pt. 58 déterminé avec le couple image 12, 13 et 23 : il y a donc trois détermination pour ce point). La comparaison de ces coordonnées pour un même état précis donne une bonne idée de la précision attendue des mesures photogrammétrique, présentées dans la section 4.

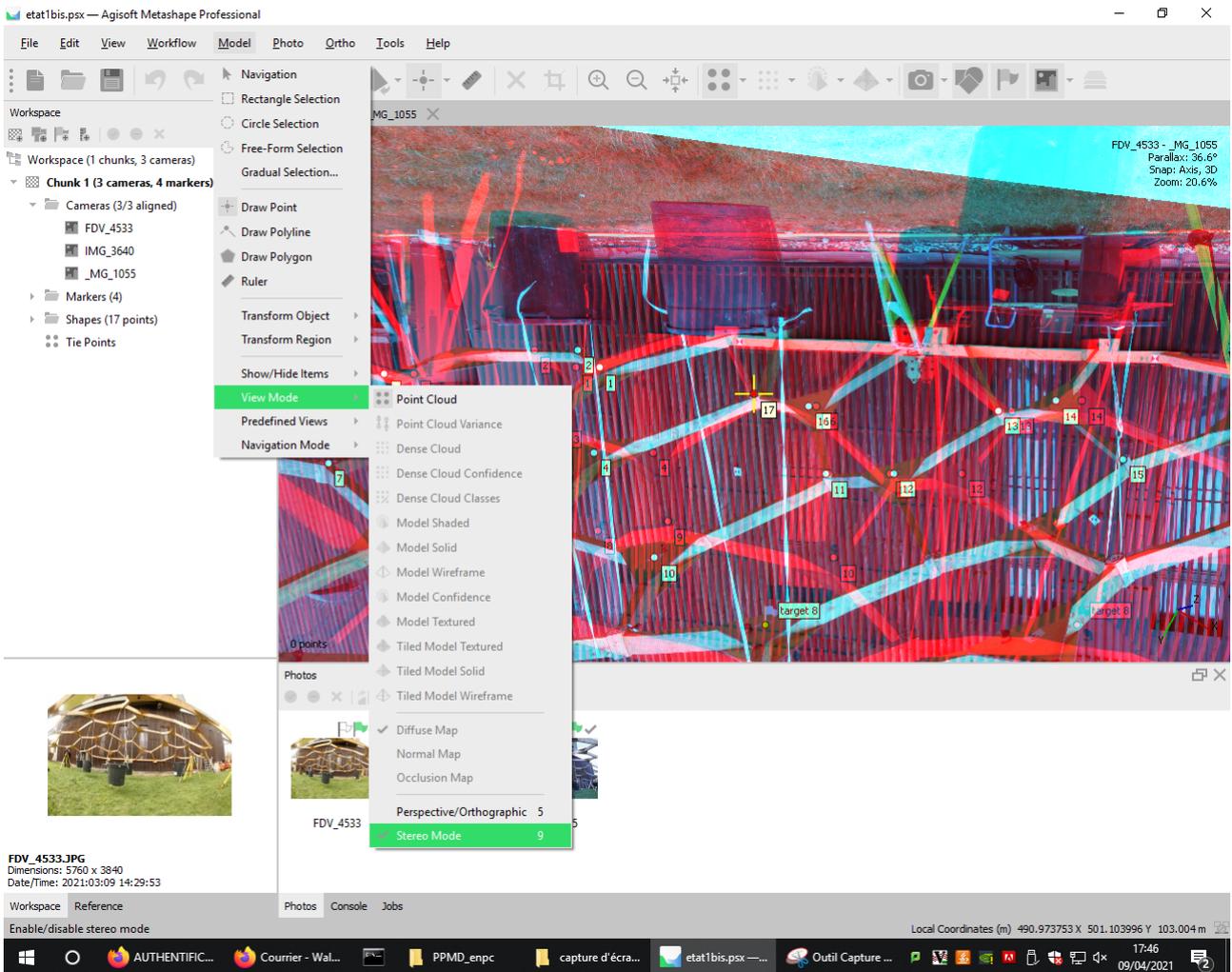


Figure 10: Interface du mode Stéréoscopique de Metashape

4 Comparaison inter-techniques

4.1 Topométrie vs LASER

Les comparaisons entre les mesures laser (station 1) et topométrie sont données en annexes (Tableaux 15, 16). Ici, à titre d'exemple, on montre juste la comparaison sur la composante verticale du déplacement entre la topométrie et la première station laser :

Table 2: Ecart (mm) en Z entre la technique topométrie et le laser en station 1

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		0.37	-1.15	1.36	0.33	0.86	
P06	-1.00	-0.80	-0.28	-0.91	1.13	0.68	0.03
P08	-0.02	-0.17	0.66	-0.61	0.76	0.58	1.23
P12	0.96	0.03	-0.55	-1.28	-0.41	1.40	-0.56
P43	-1.53	0.13	-0.50	-3.33	0.13	0.03	0.20
P45	1.47	1.36	1.23	0.33	4.41	1.67	1.97
P47	0.09	-0.14					0.38
P48	0.66	-0.63	0.29	-0.17	-0.42	-0.14	0.91
P50	0.09	0.44	0.68	0.24	1.70	1.44	0.60
P51	-0.95	1.46	0.67	-1.73	3.51	0.05	0.73
P58	0.14	-0.16	1.25	-0.03			1.01
P62	0.11	0.07			0.90		0.35
P94	0.10	0.67	0.12	0.61	1.37	2.60	-0.04
P95	-0.05	0.42	0.08	0.41	1.56	1.10	0.93
PL1	-0.35	0.42	-0.14		0.03		-0.16
PL2	0.90	-0.36	0.73	-0.82	0.34	-0.26	-0.36

Sur l'ensemble des mesures de déformation verticale, on observe un écart moyenne entre les deux technique de 0.33 mm, c'est à dire qu'elles donnent des résultats cohérents. On retrouve le même ordre de grandeur pour la deuxième station laser.

4.2 Photogrammétrie

Comme décrit en section 3.3, les traitements photogrammétriques ont été effectués avec le mode stéréoscopie de metashape. En combinant les divers couples stéréoscopiques, il est alors possible de quantifier la précision de la détermination des coordonnées par cette technique.

Table 3: Coordonnées moyennes et écart type des points photogrammétriques (en mètre), pour l'état 1

id	E moyen	N moyen	H moyen	Ecart type E	Ecart type N	Ecart type H
1	493.625	498.72	102.461	2.217	1.022	1.368
2	490.529	502.952	100.515	1.083	0.766	0.102
3	490.02	502.693	101.317	0.499	0.728	0.565
5	491.058	500.962	102.206	0.826	0.105	1.358
6	490.811	502.162	101.413	0.125	0.375	0.506
7	493.981	499.536	104.067	0.013	0.007	0.012
10	489.203	502,583	101.674	0.379	1.019	1.201
11	491.557	502.143	101.115	0.149	0.110	0.009
42	488.068	502,444	101.148	0.006	0.000	0.018
49	493.433	499.968	103.954	0.016	0.007	0.014
54	488.723	502,866	101.659	0.727	1.233	1.337
58	490.044	502.97	100.839	0.996	0.877	0.276
62	492.506	501.324	101.282	0.407	0.326	0.016
65	493.322	500.69	102.877	0.002	0.003	0.002
99	490.984	501.1	102.994	0.006	0.002	0.012
100	492.747	501.025	102.647	0.004	0.004	0.002
105	491.535	502.806	100.62	0.450	0.842	0.256

Au vu des écart-type de la table 3, nous obtenons majoritairement des précisions de l'ordre de quelques centimètres, voir dizaine de centimètres... Ces incertitudes sont beaucoup trop importantes pour pouvoir mesurer des déplacements de la structure liés aux charges, de l'ordre de quelques millimètres entre les états. Les résidus métriques sont certainement des erreurs de clics de la part de l'expérimentateur (noeuds similaires sur les images, des cibles différentes ont été superposées et cliquées en mode stereo...)

Nous avons fait de même avec l'état 6 (état le plus extrême en terme de chargement, avec des écarts normalement les plus conséquent avec l'état initial). Nous observons une nouvelle fois des écarts type de l'ordre de plusieurs millimètres voir plusieurs centimètres.

Au vu des résultats en terme d'incertitude pour la méthode photogrammétrique, elle ne semble pas exploitable pour déterminer précisément les déplacements des divers noeuds de la structure.

Table 4: Coordonnées moyennes et écart type de certains points photogrammétriques (en mètre), pour l'état 6

E moyen	N moyen	H moyen	Ecart type E	Ecart type N	Ecart type H
491.264	504.272	100.496	0.145	0.072	0.031
490.900	502.688	100.723	0.072	0.018	0.015
492.099	498.537	101.560	0.450	0.763	0.235
492.242	502.710	101.080	0.044	0.021	0.016
491.907	500.853	101.268	0.025	0.018	0.008
491.506	498.725	101.229	0.004	0.010	0.006
493.594	500.970	101.180	0.012	0.013	0.008
492.592	500.370	101.470	0.009	0.014	0.005
491.486	497.824	100.920	0.040	0.015	0.015

Ces erreurs peuvent provenir de différents éléments.

- Lors des mesures, il était difficile de garantir l'immobilité parfaite des appareils photos. L'expérimentateur devait en effet appuyer sur le bouton. Les mesures ont aussi duré plusieurs heures (chargement des poubelles en eau, scans de plusieurs minutes entre chaque états, etc). Il y a donc de grandes chances pour que les appareils aient été touchés sur les trépieds, sans parler des variations thermiques et de l'ensoleillement direct ou non au cours de la demie-journée de mesure.
- En post-traitements, les cibles ont aussi été cliquées manuellement par l'utilisateur. Il fallait alors être le plus précis en terme de recouvrement comme vu dans la figure 9. En cas de recouvrement non-idéal (cible vu de côté, déformation fisheye, etc.), l'expérimentateur devait alors cliquer au mieux entre les deux cibles. La précision au pixel était donc difficile à atteindre...

Les résultats globaux de la déformation de la structure ont donc été déterminés à partir des techniques de topométrie et LASER, plus fiables que la photogrammétrie pour cette étude.

5 Résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de déformation de la structure due aux différents états de charge. Les points auscultés sont représentés sur la Figure 11 :

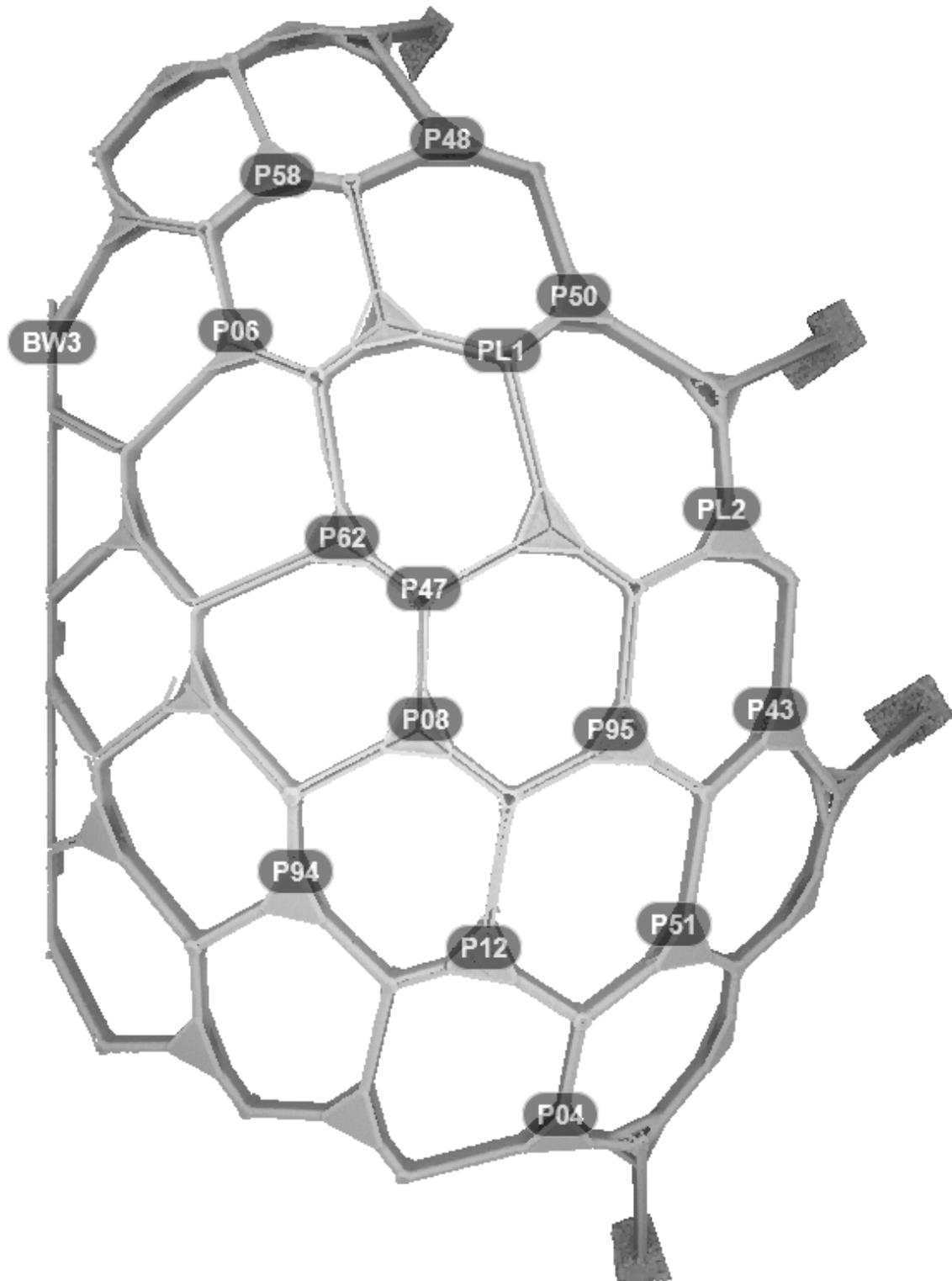


Figure 11: Plan de la structure

Le tableau suivant montre la déformation verticale moyenne de la structure. Pour chaque état de charge, nous avons moyenné les déplacements verticaux mesurés avec les différentes techniques :

Table 5: Déformation verticale moyenne (mm)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	0.13	-0.72	-1.61	-1.16	-1.49	-0.38	-2.13
P04	-3.33	-4.33	-2.64	-8.11	-6.08	-4.62	-5.97
P06	0.19	-0.22	-1.00	0.22	-1.98	-0.87	-0.64
P08	-3.84	-7.68	-11.16	-17.64	-23.43	-14.92	-5.81
P12	-4.09	-10.63	-11.53	-22.61	-25.27	-16.79	-6.12
P43	0.01	1.45	0.62	4.03	0.33	0.15	-0.52
P45	-3.10	-7.55	-8.81	-15.80	-19.04	-11.66	-4.82
P47	-3.63	-5.79	-10.36	-13.65	-22.19	-13.77	-4.44
P48	-0.56	0.46	-1.93	-1.03	-3.57	-3.24	-1.59
P50	-1.76	-2.46	-5.21	-3.82	-10.55	-7.96	-2.34
P51	-0.17	-0.60	-0.16	1.38	-0.42	0.07	-0.83
P58	-0.62	0.66	-1.49	-0.57	-1.84	-1.41	-0.82
P62	-1.97	-3.40	-6.07	-7.47	-13.13	-8.85	-3.39
P94	-3.25	-10.12	-10.44	-20.75	-22.81	-15.70	-5.97
P95	-2.78	-5.45	-8.75	-12.26	-18.90	-12.07	-4.40
PL1	-2.31	-2.43	-6.10	-5.29	-13.56	-9.20	-3.40
PL2	-1.95	-0.72	-4.97	-3.19	-10.17	-5.77	-1.62

La Figure 12 donne une représentation visuelle des déformations verticales pour l'ensemble des nos points d'auscultation:

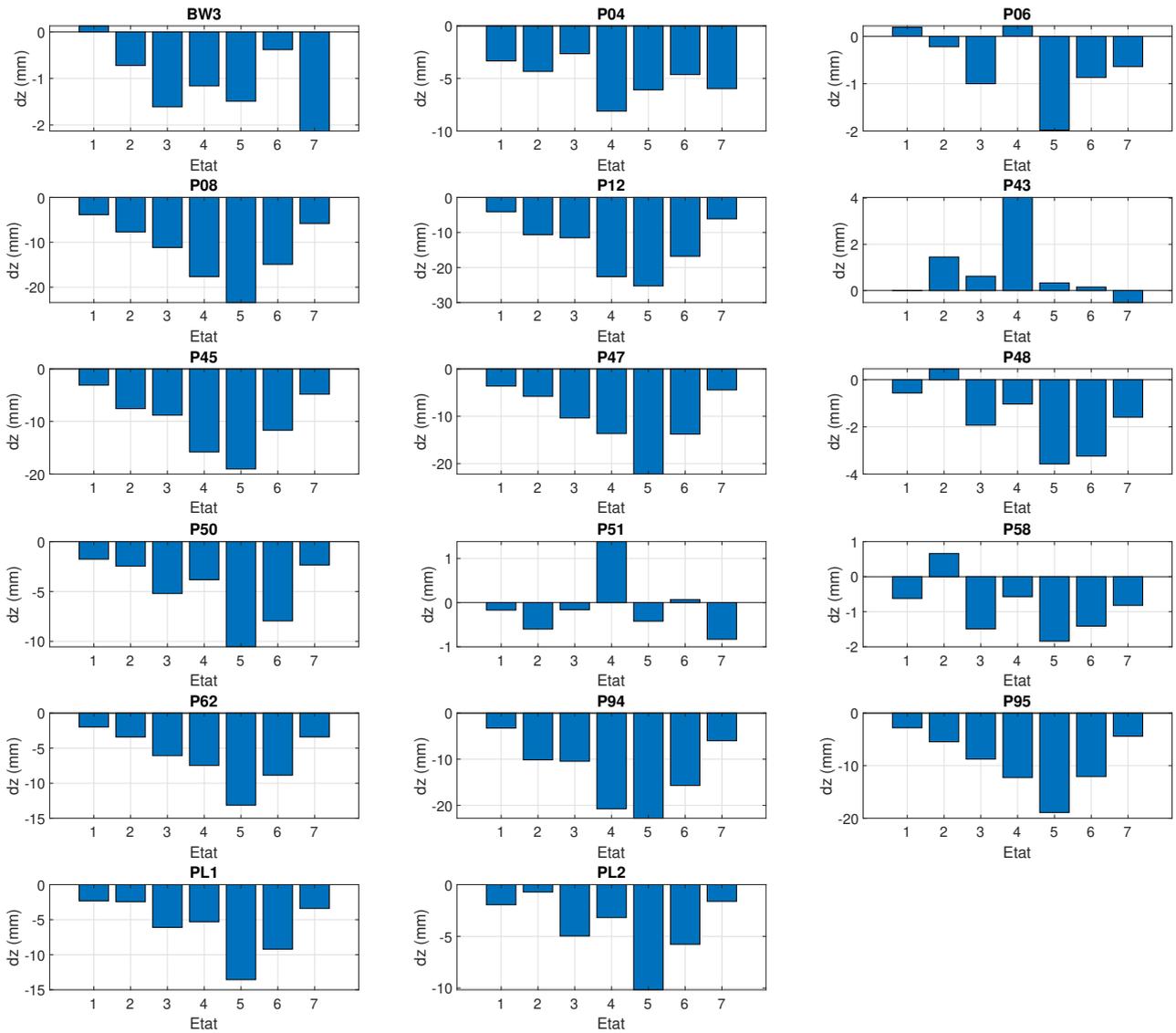


Figure 12: Déformation verticale moyenne (mm)

On observe une tendance globale de déplacement vertical négatif de quelques millimètres à plusieurs centimètres au niveau de nœuds supportant la charge. Certains nœuds se déplacent en sens inverse, plutôt localisés à la périphérie de la structure. Concrètement, cela correspond à un affaissement au centre de la structure et un soulèvement sur les bords.

Au niveau des déplacements horizontaux, les deux techniques, laser et topométrie, produisent des résultats peu cohérents : suivant la composante X, le déplacement max observé en topométrie est de 7.60mm contre -7.17mm par la technique laser sur le prisme (P51). Les valeurs maxi sur la composante Y, le déplacement maxi observé est de -5.10 mm (P45) ; nous avons donc décidé de ne pas les inclure dans ce chapitre, nécessitant une analyse plus approfondie. Ils sont cependant disponibles dans les Annexes.

Les résultats sont également visibles dans un modèle 3D à l'adresse suivante :

<http://dias.engg.eu/2021/StructureENPC/>

6 Conclusion

On observe une bonne cohérence entre LASER et topométrie, avec des écarts de l'ordre du millimètre, ce qui est raisonnable au vu des déformations observées qui sont de l'ordre du centimètre.

Ce projet nous a donc permis de mettre en application trois techniques d'oscultation pour réaliser ce suivi de structure. En plus d'avoir des résultats assez cohérents entre topométrie et LiDAR, nous avons pu observer une véritable tendance entre les états : affaissement avec les charges plus élevées, puis remise en place de la structure en fin d'expérience.

7 Annexes

Table 6: Déformations en mm suivant l'axe X (topométrie)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		2.00	1.40	4.60	3.50	2.50	
P06	-0.50	-0.40	-1.10	-0.90	-2.10	-1.40	-0.40
P08	-0.20	0.00	-0.30	0.20	-0.20	-0.10	-0.20
P12	-0.10	0.80	0.30	2.00	1.20	0.80	0.30
P43	0.70	3.00	3.40	7.30	8.30	5.10	1.40
P45	-0.10	0.60	0.30	1.60	1.10	0.40	-0.40
P47	0.00	0.40					0.00
P48	-0.50	-0.40	-0.90	-0.60	-1.60	-1.10	-0.30
P50	-0.20	0.30	0.40	1.10	1.00	0.60	0.10
P51	1.50	4.90	5.20	10.90	11.70	7.60	2.80
P58	-0.60	-0.50	-1.20	-1.10			-0.50
P62	0.20	0.30			0.60		0.10
P94	0.40	1.30	1.10	2.60	2.20	1.40	0.50
P95	0.00	1.30	0.80	3.20	2.80	1.70	0.20
PL1	-0.50	-0.40	-0.90		-1.60		-0.50
PL2	0.60	2.00	2.60	5.40	7.00	4.20	0.80

Table 7: Déformations en mm suivant l'axe Y (topométrie)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		0.80	-0.40	0.70	-1.50	-0.90	
P06	0.70	0.90	1.90	2.30	3.90	2.30	0.60
P08	-0.10	0.60	-0.30	0.30	-0.90	-0.60	-0.30
P12	-0.20	0.30	-1.10	-0.20	-2.70	-1.50	-0.20
P43	0.10	0.60	-0.60	0.20	-2.00	-1.40	-0.40
P45	-0.80	-1.40	-2.30	-3.50	-5.10	-3.50	-1.40
P47	0.20	0.20					-0.30
P48	0.80	0.90	1.50	1.60	2.30	1.40	0.20
P50	0.80	1.10	1.60	1.80	2.20	1.30	0.30
P51	-0.60	-0.80	-2.40	-2.70	-5.60	-3.60	-1.10
P58	0.70	0.70	1.80	1.80			0.30
P62	0.80	1.00			2.50		0.40
P94	-0.40	-0.60	-1.60	-1.90	-3.90	-2.30	-0.80
P95	-0.20	0.30	-1.20	-0.70	-3.50	-2.30	-0.60
PL1	0.30	0.40	0.00		-0.80		-0.40
PL2	0.40	0.80	-0.20	0.50	-1.30	-1.00	-0.30

Table 8: Déformations en mm suivant l'axe Z (topométrie)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		-3.90	-3.00	-7.40	-5.80	-3.80	
P06	-0.50	-0.40	-1.00	-1.00	-1.70	-1.10	-0.40
P08	-3.70	-7.80	-11.00	-17.70	-23.40	-14.50	-5.00
P12	-3.90	-10.70	-11.80	-23.10	-25.30	-16.20	-6.00
P43	-0.10	1.50	0.10	2.90	0.40	0.50	0.20
P45	-2.50	-6.70	-7.90	-14.90	-17.30	-10.80	-3.80
P47	-3.30	-5.40					-4.20
P48	-0.10	0.10	-1.20	-0.90	-3.30	-2.60	-0.70
P50	-1.10	-0.70	-3.80	-3.30	-8.80	-6.20	-1.80
P51	-0.10	0.30	0.40	1.20	1.50	1.00	0.10
P58	-0.20	-0.10	-0.60	-0.50			-0.30
P62	-2.00	-3.00			-12.70		-2.60
P94	-3.50	-9.20	-10.10	-20.10	-21.90	-14.00	-5.50
P95	-2.80	-4.80	-8.50	-11.80	-18.20	-11.20	-3.60
PL1	-2.00	-2.00	-6.50		-14.50		-2.70
PL2	-1.50	-0.90	-4.60	-3.60	-10.00	-5.90	-1.80

Table 9: Déformations en mm suivant l'axe X (Laser station 1)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	-0.70	-0.55	-0.67	0.09	-0.58	-0.43	-1.46
P04	-0.37	-2.01	-0.46	-2.32	-0.76	-1.13	-1.83
P06	-1.62	-0.49	-2.47	0.34	2.56	0.52	-1.34
P08	-0.37	1.59	-2.08	0.43	-0.55	-0.21	1.07
P12	3.08	1.56	3.05	1.16	-0.49	-0.09	3.36
P43	0.00	-2.87	-1.98	-1.25	-6.35	-4.27	0.00
P45	0.64	-2.62	-2.38	0.49	2.99	0.34	-1.40
P47	-0.49	0.03	-0.46	-1.25	-0.89	-0.89	-0.24
P48	0.34	0.58	-0.03	0.61	2.14	1.62	-1.07
P50	0.73	-0.09	0.34	0.89	-0.31	-1.22	-1.22
P51	-1.22	-8.18	-6.29	-8.54	-13.61	-7.17	-5.34
P58	-0.09	1.01	1.71	2.04	0.92	1.13	-0.09
P62	1.16	1.16	-0.49	-0.37	-1.31	0.67	-0.03
P94	0.92	-3.36	-0.58	-6.16	-6.29	-3.17	-2.04
P95	0.89	-1.16	1.34	-1.86	-3.36	-1.68	-0.85
PL1	-0.52	-1.01	0.18	0.24	1.40	0.82	-1.77
PL2	-6.16	-1.13	-4.15	-5.74	-7.17	-6.84	-2.47

Table 10: Déformations en mm suivant l'axe Y (Laser station 1)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	0.79	0.43	-1.77	-1.16	-0.73	-0.58	-1.74
P04	5.34	-0.46	-2.69	1.37	-0.21	0.67	8.94
P06	-1.10	-2.53	-2.78	-3.11	-2.53	-1.95	-1.28
P08	-1.40	0.52	2.53	-2.38	3.81	1.53	3.85
P12	3.42	1.65	-1.59	-2.99	0.76	5.71	-3.54
P43	-1.50	1.74	3.27	1.10	7.23	2.99	0.00
P45	1.25	4.27	0.76	0.43	10.28	2.53	2.81
P47	-0.92	2.20	0.55	-1.16	1.04	2.04	1.07
P48	-1.10	0.06	0.03	-1.80	-1.86	-0.79	-0.40
P50	-0.24	-0.40	-1.92	-2.53	-1.25	0.43	0.95
P51	-1.65	-1.95	-0.49	-4.27	3.69	0.49	-4.58
P58	0.27	0.92	-2.08	-2.01	-2.66	-1.89	-0.55
P62	2.17	2.14	-1.37	-1.25	-3.05	1.13	1.83
P94	-0.43	2.81	-2.62	4.12	5.25	7.45	0.18
P95	-1.83	2.50	-0.89	4.64	-2.38	-2.29	6.16
PL1	0.43	0.61	-0.09	0.15	1.22	1.01	-0.18
PL2	6.68	0.09	2.93	1.71	3.08	6.68	1.77

Table 11: Déformations en mm suivant l'axe Z (Laser station 1)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	0.44	-0.11	-1.95	-0.73	-1.49	0.54	-1.40
P04	-4.70	-4.27	-1.85	-8.76	-6.13	-4.66	-8.20
P06	0.50	0.40	-0.72	-0.09	-2.83	-1.78	-0.43
P08	-3.69	-7.63	-11.66	-17.09	-24.16	-15.08	-6.23
P12	-4.86	-10.73	-11.25	-21.82	-24.89	-17.60	-5.44
P43	1.43	1.37	0.60	6.23	0.27	0.47	0.00
P45	-3.97	-8.06	-9.13	-15.23	-21.71	-12.47	-5.77
P47	-3.39	-5.26	-10.51	-12.70	-21.93	-13.79	-4.58
P48	-0.76	0.73	-1.49	-0.73	-2.88	-2.46	-1.61
P50	-1.19	-1.14	-4.48	-3.54	-10.50	-7.64	-2.40
P51	0.85	-1.16	-0.27	2.93	-2.01	0.95	-0.63
P58	-0.34	0.06	-1.85	-0.47	-1.85	-2.00	-1.31
P62	-2.11	-3.07	-6.13	-7.29	-13.60	-8.43	-2.95
P94	-3.60	-9.87	-10.22	-20.71	-23.27	-16.60	-5.46
P95	-2.75	-5.22	-8.58	-12.21	-19.76	-12.30	-4.53
PL1	-1.65	-2.42	-6.36	-4.58	-14.53	-9.51	-2.54
PL2	-2.40	-0.54	-5.33	-2.78	-10.34	-5.64	-1.44

Table 12: Déformations en mm suivant l'axe X (Laser station 2)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	-1.92	-1.22	-1.71	-1.68			-1.37
P04	0.03	-3.75	-1.19	-4.39	-2.17	-2.47	-1.56
P06	-2.29	-0.06	0.43	-5.86	-0.61	-3.17	-1.10
P08	-1.19	-1.13	-0.34	0.37	-1.01	1.10	0.03
P12	-0.95	-2.01	0.46	-1.89	-3.72	-1.77	-1.43
P43	-3.60	-3.08	-1.16	-7.02		-5.31	-3.81
P45	0.73	0.55	2.08	-3.54	-1.89	0.09	-0.18
P47	-0.43	0.52	-1.50	-0.76	-0.40	0.24	-0.43
P48	-1.43	0.00	0.64	-1.92	-0.03	-2.93	-1.19
P50	-8.39	-10.65	-5.83	-4.55	-5.31	-1.10	-6.20
P51	-3.60	-4.76	-6.65	-11.35	-15.11	-9.70	-5.40
P58	0.06	-3.78	-0.18	2.99	6.07	-0.89	-0.79
P62	-4.85	-0.82	-2.59	-4.82	-2.59	-2.11	-1.34
P94	0.76	0.43	-3.45	-4.64	-4.21	-1.16	-2.99
P95	1.01	-2.72	-1.65	-3.39	-3.94	-1.43	-1.28
PL1	-1.80	-1.10	0.12	0.24	-1.25	-1.83	-1.28
PL2	-2.40	-0.54	-5.33	-2.78	-10.34	-5.64	-1.44

Table 13: Déformations en mm suivant l'axe Y (Laser station 2)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	-5.04	2.69	0.37	-3.51		-1.34	0.12
P04	-0.70	-1.40	-0.61	-1.22	0.37	-0.12	-0.92
P06	4.27	-4.73	-2.99	4.76	-2.17	-1.77	-2.01
P08	-0.95	-3.27	-0.73	-0.49	2.20	-3.08	-0.31
P12	-2.69	-2.53	0.12	0.46	5.28	0.37	-1.13
P43	-8.85	-4.52	-2.20	-4.33		-1.80	-4.46
P45	-3.94	-0.58	1.86	6.29	2.26	-0.89	-2.78
P47	0.03	-1.34	-5.16	-1.86	2.56	-13.46	2.75
P48	-4.03	-1.22	-5.19	-3.88	-4.18	-3.91	-3.14
P50	2.35	0.31	-2.84	0.00	-2.84	-5.43	5.22
P51	-0.73	-0.18	-0.24	0.31	2.56	2.41	-2.04
P58	-5.98	3.33	-7.08	-1.68	0.00	-1.56	1.25
P62	-4.49	-7.57	-3.14	-4.55	0.15	-1.80	-2.41
P94	-4.73	1.89	1.83	1.43	1.71	3.48	-0.85
P95	1.59	-0.52	2.56	1.62	3.91	2.35	0.49
PL1	-2.44	-2.23	-0.95	-0.37	-0.40	-4.79	-1.98
PL2							

Table 14: Déformations en mm suivant l'axe Z (Laser station 2)

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3	-0.18	-1.33	-1.28	-1.59		-1.30	-2.87
P04	-1.95	-4.83	-3.05	-8.18	-6.32	-5.39	-3.74
P06	0.57	-0.66	-1.27	1.74	-1.42	0.26	-1.11
P08	-4.14	-7.61	-10.83	-18.14	-22.74	-15.18	-6.21
P12	-3.52	-10.48	-11.55	-22.92	-25.63	-16.56	-6.94
P43	-1.31	1.46	1.16	2.98		-0.51	-1.75
P45	-2.84	-7.89	-9.40	-17.27	-18.11	-11.72	-4.88
P47	-4.20	-6.71	-10.20	-14.59	-22.46	-13.76	-4.53
P48	-0.82	0.54	-3.11	-1.46	-4.52	-4.66	-2.47
P50	-2.99	-5.55	-7.34	-4.61	-12.35	-10.03	-2.84
P51	-1.25	-0.93	-0.63	0.02	-0.74	-1.73	-1.96
P58	-1.33	2.01	-2.01	-0.73	-1.82	-0.82	-0.85
P62	-1.80	-4.14	-6.01	-7.66	-13.08	-9.27	-4.62
P94	-2.64	-11.28	-11.01	-21.42	-23.25	-16.49	-6.95
P95	-2.78	-6.32	-9.19	-12.76	-18.74	-12.72	-5.07
PL1	-3.27	-2.86	-5.43	-6.01	-11.65	-8.89	-4.95
PL2							

Table 15: Ecart (mm) en X entre la technique topométrie et le laser en station 1

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		4.01	1.86	6.92	4.26	3.63	
P06	1.12	0.09	1.37	-1.24	-4.66	-1.92	0.94
P08	0.17	-1.59	1.78	-0.23	0.35	0.11	-1.27
P12	-3.18	-0.76	-2.75	0.84	1.69	0.89	-3.06
P43	0.70	5.87	5.38	8.55	14.65	9.37	1.40
P45	-0.74	3.22	2.68	1.11	-1.89	0.06	1.00
P47	0.49	0.37					0.24
P48	-0.84	-0.98	-0.87	-1.21	-3.74	-2.72	0.77
P50	-0.93	0.39	0.06	0.21	1.31	1.82	1.32
P51	2.72	13.08	11.49	19.44	25.31	14.77	8.14
P58	-0.51	-1.51	-2.91	-3.14			-0.41
P62	-0.96	-0.86			1.91		0.13
P94	-0.52	4.66	1.68	8.76	8.49	4.57	2.54
P95	-0.89	2.46	-0.54	5.06	6.16	3.38	1.05
PL1	0.02	0.61	-1.08		-3.00		1.27
PL2	6.76	3.13	6.75	11.14	14.17	11.04	3.27

Table 16: Ecart (mm) en Y entre la technique topométrie et le laser en station 1

Nœud	Etat 1	Etat 2	Etat 3	Etat 4	Etat 5	Etat 6	Etat 7
BW3							
P04		1.26	2.29	-0.67	-1.29	-1.57	
P06	1.80	3.43	4.68	5.41	6.43	4.25	1.88
P08	1.30	0.08	-2.83	2.68	-4.71	-2.13	-4.15
P12	-3.62	-1.35	0.49	2.79	-3.46	-7.21	3.34
P43	1.60	-1.14	-3.87	-0.90	-9.23	-4.39	-0.40
P45	-2.05	-5.67	-3.06	-3.93	-15.38	-6.03	-4.21
P47	1.12	-2.00					-1.37
P48	1.90	0.84	1.47	3.40	4.16	2.19	0.60
P50	1.04	1.50	3.52	4.33	3.45	0.87	-0.65
P51	1.05	1.15	-1.91	1.57	-9.29	-4.09	3.48
P58	0.43	-0.22	3.88	3.81			0.85
P62	-1.37	-1.14			5.55		-1.43
P94	0.03	-3.41	1.02	-6.02	-9.15	-9.75	-0.98
P95	1.63	-2.20	-0.31	-5.34	-1.12	-0.01	-6.76
PL1	-0.13	-0.21	0.09		-2.02		-0.22
PL2	-6.28	0.71	-3.13	-1.21	-4.38	-7.68	-2.07