

ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

RAPPORT DE PROJET



Mesures de déformations par photogrammétrie



Emilie JOCHEL, Clément BEAUVALLET
Louis-Marie GAUER et Apolline DE WIT

Professeur référent
Antoine PINTE

Sommaire

1	Système et paramètres d'acquisition	3
1.1	Paramètres de l'appareil photo	3
1.2	Système d'acquisition	4
2	Déplacement en 2D	6
2.1	Principe	6
2.1.1	La corrélation	6
2.1.2	Fonctionnement de MicMac	7
	Les entrées	7
	Les sorties	7
2.1.3	Les contraintes d'acquisition	8
	L'orthogonalité :	8
	Stabilité	9
	Les ombres	9
2.2	Tests et résultats	10
2.2.1	Translation d'une image	10
2.2.2	Rotation des images	10
2.2.3	Boîte	11
	Déplacement de 0,5 mm :	11
	Déplacements de 0,1 mm :	12
	Seuil de détection du déplacement en pixel :	13
2.2.4	Test grandeur nature sur le pont de Mane :	13
3	Déplacement en 3D	15
3.1	Principe	15
3.2	Fonctionnement de l'outil	16
3.3	Résultats	18

Introduction

Ce stage doit permettre d'évaluer les outils de la photogrammétrie terrestre pour mesurer des déformations. Celles-ci sont généralement observées par des images satellitaires ou des mesures terrestres (GPS, laser, topométrie). Il est ici question d'étudier les apports de la photogrammétrie dans la métrologie. Celle-ci peut conférer une plus grande précision que les images satellitaires et le coût de mise en œuvre de la photogrammétrie est bien moindre que celle de la lasergrammétrie. Elle est également plus rapide à réaliser que la topométrie (où il faut installer les différentes stations de la polygonale, s'orienter, etc.).

La photogrammétrie détermine la forme et la position d'un objet dans l'espace à partir de l'analyse de photographies prises sous différents angles de vue.

Le processus se déroule généralement en quatre étapes :

- détection de détails sur plusieurs images (points homologues).
- mise en correspondance des points homologues des différentes vues.
- calcul de leurs positions dans l'espace.
- calcul d'un nuage de points (reconstruction dense)

Ce projet vise à tester les outils de la photogrammétrie pour déterminer s'ils sont efficaces dans la mesure de déformations et de déplacements d'objets.

Partie 1

Systeme et parametres d'acquisition

1.1 Parametres de l'appareil photo

Différents appareils photographiques de la marque Canon ont été utilisés durant nos expérimentations :



Le Canon EOS 70D : capteur CMOS haute résolution de 20 millions de pixels (5472*3648).

Le Canon EOS 80D : capteur CMOS haute résolution de 24 millions de pixels (6000*4000).



Le Canon EOS 5D MarkIII : capteur CMOS haute résolution de 22 millions de pixels (5760*3840)

Les paramètres à régler pour la prise de vue sont détaillés ci-dessous :

- **La focale** : L'une des caractéristiques principales du système optique, elle représente la distance entre le centre optique de l'objectif et le foyer. Elle correspond au "niveau de zoom".
- **La mise au point** : Régler la netteté de l'image. Elle doit rester fixe pendant tout le reste de la prise de vue (il faut donc désactiver l'auto-focus).
- **L'ouverture** : Elle correspond à la formule $N = \frac{F}{D}$ avec F, la focale, et D, le diamètre d'ouverture.
- **L'ISO** : Ce paramètre permet de régler la sensibilité du capteur et donc l'exposition. Il est préférable de le laisser le plus bas possible car cela peut introduire du bruit.

- **Le temps de pose :** Temps d'ouverture du diaphragme. Plus il est long, plus il permet à de la lumière de rentrer dans l'objectif. Pour autant, un long temps de pose implique un plus gros risque de flou de bougé.
- **Balance des blancs :** Ce paramètre permet de prendre en compte la source de lumière lors de la prise de vue. La plupart du temps, il est laissé sur lumière naturelle. En cas de mauvais temps, la balance des blancs peut être mise sur "Nuageux" par exemple.

1.2 Système d'acquisition

Principe : Un appareil photo acquiert une série d'images ("time-lapse") depuis le même point de vue. Il s'agit d'un système facile à mettre en œuvre qui nécessite quelques précautions à prendre pour bien stabiliser l'appareil photographique.

Système statique : L'appareil photographique nécessite d'être stabilisé correctement pour pouvoir contrôler au mieux la déformation.



L'appareil est maintenu le plus fixement possible à l'aide d'une attache en métal vissée à l'appareil et maintenue dans une embase reposant sur un trépied. Un cylindre en plastique permet à l'appareil de reposer sur une plus grande surface afin d'éviter qu'il oscille de haut en bas. Le déclenchement de la prise de vue se fait par Wi-fi à l'aide d'une application (ici *Camera Connect Canon* car tous nos appareils étaient de cette marque) pour éviter de bouger l'appareil lors du déclenchement.

Précautions à prendre :

- La réfraction atmosphérique causée par la chaleur vient perturber l'acquisition en créant des ondulations (Cf. *Gif_chaleur.gif*). Elles sont bien visible sur cette photo du Pont de Mane qui montre le déplacement en x.



- Il ne faut pas oublier de désactiver l'auto-focus pour que la focale et la mise au point restent les mêmes tout au long de la prise de vue. Cela implique d'avoir au préalable choisi la focale de l'objectif (en fonction de la résolution souhaitée) et d'avoir paramétré la radiométrie de l'appareil (balance des blancs).

Tests fictifs : Pour contrôler la direction du déplacement et la calculer facilement, des tests fictifs de déformation ont été réalisés.

Pour photographier un objet depuis un point fixe, un trépied lourd est utilisé. Une embase est posée dessus sur laquelle une translation précise au dixième de millimètre peut être effectuée. L'objet dont l'on souhaite observer la déformation est posé dessus. Ces tests ont permis de créer une vérité terrain, c'est-à-dire un déplacement dont la valeur est connue.



Partie 2

Déplacement observé en 2 dimensions dans le plan image avec un appareil photo

2.1 Principe

Tout notre travail repose sur la corrélation entre deux images, qui permet d'identifier les similitudes et les différences entre elles.

2.1.1 La corrélation

Cette technique consiste à identifier automatiquement le même détail sur deux images (ou plus) différentes. Il s'agit donc de trouver des points homologues, qui sont en réalité des vignettes - des zones de pixels - centrées sur détail de l'image à comparer. Pour chaque image de référence (image maîtresse), la vignette de référence est comparée à toutes les autres vignettes de même taille dans la seconde image. Une zone de recherche est définie au préalable pour limiter les temps de calcul.

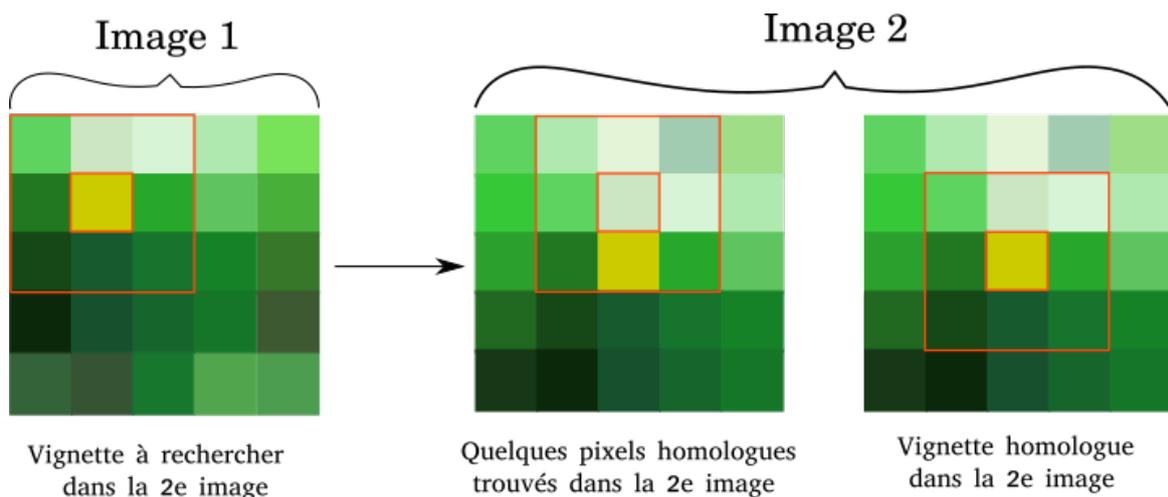


Figure 2.1: Déplacement d'un pixel en x et d'un pixel en y

La corrélation témoigne de l'intensité de la ressemblance entre plusieurs variables (ici entre deux photos). Le coefficient de corrélation correspond au rapport $\rho = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$. Le score de corrélation trouve ses valeurs dans l'intervalle $[-1; +1]$. Si $\rho=0$, les deux variables ne sont pas corrélées. Si $\rho = \pm 1$, les deux photos sont corrélées. Cela signifie qu'un point dans la première image a été correctement retrouvé dans la deuxième image.

Un score de corrélation est calculé dont le résultat est normalisé et compris entre 0 et 255 (codage des valeurs en 8 Bits à la fin du calcul). Deux vignettes sont donc homologues lorsque le coefficient de corrélation est proche de 255. Ainsi, la corrélation permet de rallier tous les points homologues sur toutes les images. .

2.1.2 Fonctionnement de MicMac

Les entrées

L'observation de la déformation d'un objet se fait sur deux images à l'aide de la commande *MICMAC* du logiciel MicMac. Ces deux images sont mises dans un dossier nommé en fonction de la déformation à observer. Le fichier *.xml* y est joint ainsi que le masque créé sur l'une des deux images. Celui-ci est défini sur l'une des images pour simplifier les calculs en se concentrant sur la zone d'intérêt.

Les paramètres de calcul sont choisis dans le fichier *.xml* comme le nom des images et du masque, la taille de la zone de recherche des points homologues, le coefficient de corrélation minimal à prendre en compte, etc. (Cf. *AnnexeParam.pdf* et *AnnexeXML.pdf*)

MicMac calcule alors les déplacements par corrélation subpixelaire, et l'on peut observer dans les fichiers de sorties les déplacements d'une photo à l'autre suivant les deux composantes x et y.

Les sorties

Px et Py : Valeurs du déplacement en x et y.



Rho : Norme du déplacement : $\sqrt{Px^2 + Py^2}$



Teta : Il s'agit de l'angle du déplacement.



Pour qualifier les résultats obtenus et vérifier leur cohérence, nous pouvons regarder les fichiers *Corr* générés par la commande *MICMAC*.

Corr : Les fichiers *Corr* contiennent les valeurs du score de corrélation. (Cf. 2.1.1)

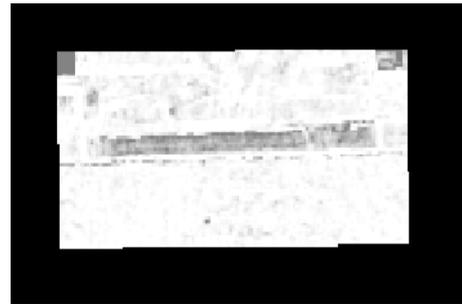
Elles sont normalisées entre 0 et 255 du fait du codage des valeurs en 8 Bits. Un bon score de corrélation s'observe donc lorsque les valeurs s'approchent de 255 sur l'ensemble de la photographie.

Statistiques sur l'image :

Moyenne : 246

Variance : 498

Ecart type : 22.3159136044

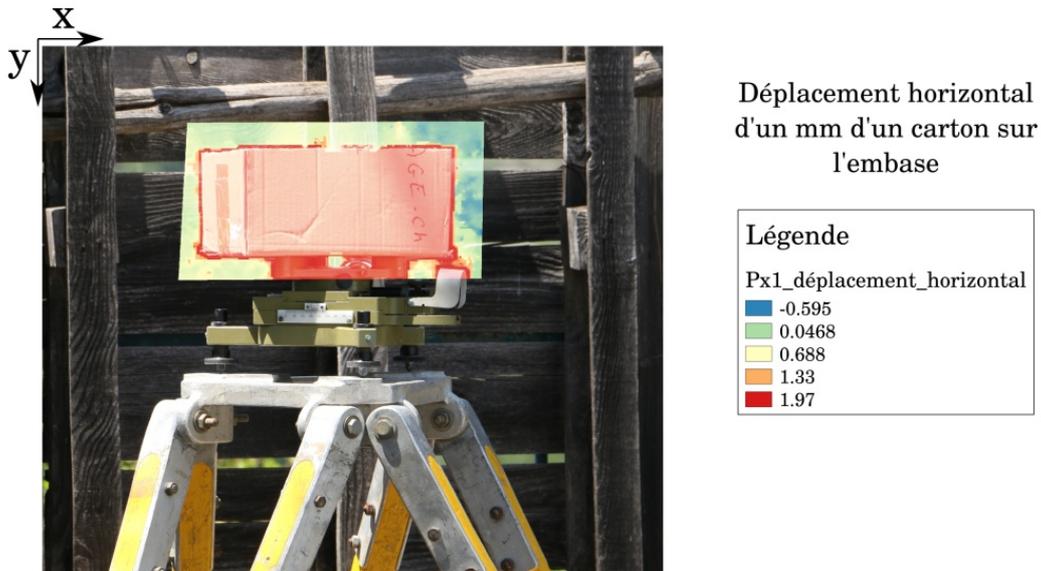


Il faut cependant vérifier que le CorrelMin choisit n'est pas trop fort (auquel cas, la régularisation de l'image en fin de calcul vient modifier la déformation observée (cf. *AnnexeParam.pdf*)).

2.1.3 Les contraintes d'acquisition

L'orthogonalité :

Il est préférable d'avoir un objectif orthogonal au déplacement de l'objet afin de faciliter son analyse.

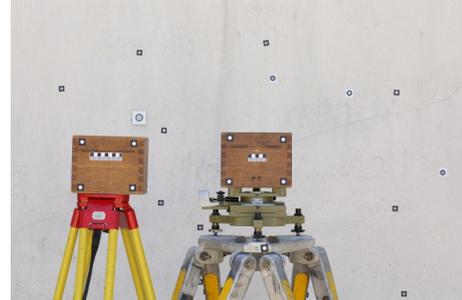
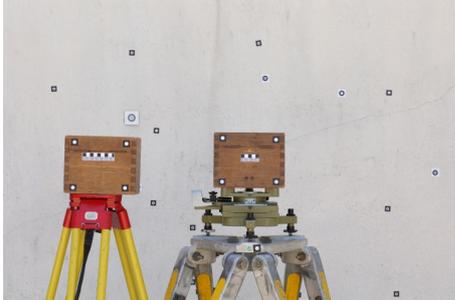


L'un de nos premiers tests a consisté à placer un carton sur un pied lourd et le déplacer d'un mm sur l'embase. L'appareil photographique n'était pas tout à fait en face de l'objet ce qui fait que l'on obtient un mouvement latéral dans les deux dimensions. Sur Gimp, le déplacement est de 4 pixels en x et de 2 pixels en y. On observe ainsi un déplacement de 0.49mm en x du fait de l'angle de la prise de vue. Cela confirme qu'il est préférable d'être orthogonal au déplacement pour pouvoir le mesurer correctement.

Stabilité

Si l'appareil photo vient à bouger pendant la prise de vue, les photos seront décalées. Il est nécessaire de corriger cet écart.

La commande SEL : Avec cette commande, il est possible de re-superposer les deux images.



An old and ugly tool, but it can help. For creating a few set of tie points and save in XML format :

```
SEL ./ Face2-IMG5331.JPG Face2-IMG5333.JPG KH=S
```

Afin de tester l'influence et l'efficacité de l'outil SEL, nous avons utilisé deux images non parfaitement superposables présentant un déplacement horizontal de 4,4 pixels d'une boîte. Pour recalibrer les images, nous avons saisi avec la commande *SEL* de MIC-MAC une zone de recherche dans laquelle sont recherchés des points d'appuis.

Statistiques en pixel	En x sans SEL	En x avec SEL	En y sans SEL	En y avec SEL
Moyenne :	-3,8561	-4.3759	-1,8698	-0,0380
Variance :	0,0081	0,0048	0,0001	0,0048
Écart-type :	0,0901	0,0698	0,0132	0,0698

Les résultats démontrent clairement que SEL tend à nous rapprocher de la vérité. En effet, on constate que, le décalage vertical est beaucoup plus faible pour les images recalées à l'aide de SEL. Il passe de 1.870 pixels à 0.038 pixels après utilisation de la commande *SEL*. D'autre part, en ce qui concerne le mouvement de la boîte, la valeur obtenue sur les images recalées (4.376 pixels) est beaucoup plus proche de celle attendue.

Cette commande permet ainsi d'être moins exigeant avec la prise de vue et de corriger le décalage d'une photo à l'autre, si une zone stable est visible.

Les ombres

- Il faut veiller aux ombres et donc aux changements de radiométrie lors de la déformation de l'objet.



Ce test visait à montrer la déformation d'un pont lors du passage d'un camion. Or, les taches

d'ombre dues aux feuilles des arbres ont bougé sur le pont avec le vent. L'image ci-contre présente alors une déformation due aux changements de luminosité, au niveau des tâches rouges.

2.2 Tests et résultats

2.2.1 Translation d'une image

Un script python (Cf. *deformation.py.pdf*) a permis de tester le logiciel MicMac sur la déformation du pont de Mane. Il duplique une image et supprime dans l'une la première ligne, et dans l'autre la dernière ligne.



Le déplacement en y est satisfaisant car l'on obtient presque 1 pixel comme attendu, avec une erreur de 0.05 pixels.

Statistiques sur le Rho :
Moyenne : 0.9666 pixels
Variance : 0.0034 pixels
Ecart-type : 0.0590 pixels
→ Normale de 1 attendue.

Statistiques sur le Teta :
Moyenne : 1.5851 radians
Variance : 0.0016 radians
Ecart-type : 0.1290 radians
→ comme la déformation est verticale, on s'attend à un angle de $\pi/2$, soit environ 1.57079.

Statistiques sur le déplacement en x :
Moyenne : -0.0125 pixels
Variance : 0.0017 pixels
Ecart type : 0.0417 pixels
Xmin : -0.1696 pixels
Xmax : 0.1739 pixels
→ presque aucun déplacement en x (1/500e de pixels)

Ce test a été réalisé en supprimant les tuyaux du masque car les premiers résultats en les conservant montraient que la commande *MICMAC* n'est pas optimale pour traiter les textures en fer et en métal. La corrélation était bien plus faible sur ces zones.

Ce test est donc assez concluant car les résultats correspondent à nos attentes.

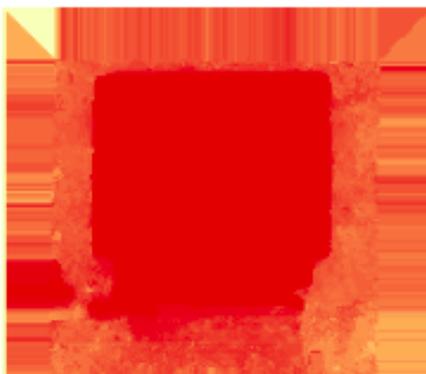
2.2.2 Rotation des images

Pour qualifier la précision de ce paramètre, deux photos d'une boîte présentant un déplacement vers la gauche ont été tournées de différents angles. Les angles de 90 et 180 degrés présentent

des résultats satisfaisants. Pour les autres angles, le logiciel Gimp sur lequel les photos sont tournées, attribue de nouvelles valeurs aux pixels. L'erreur est alors plus grande pour le calcul de l'angle.

Précision des tests : *valeur théorique* - *valeur obtenue*

- Erreur sur la rotation de 180 degrés : -0.0449 degrés
- Erreur sur la rotation de 45 degrés : -0.1217 degrés
- Erreur sur la rotation de -90 degrés : -0.0190 degrés



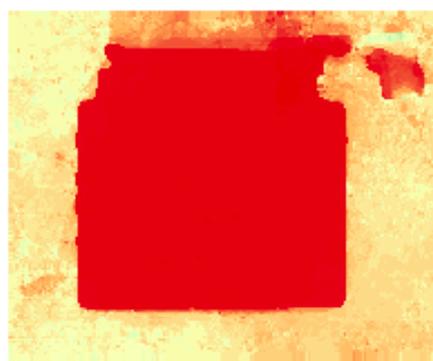
Statistiques sur l'image :
Moyenne : -3.1039 radians
= -177.8414 degrés
Variance : 5.4852e-05 radians
Ecart type : 0.0074 radians



Statistiques sur l'image tournée de 45 degrés :
Moyenne : -2.3163 radians
= -132.7196 degrés
Variance : 0.0007 radians
Ecart type : 0.02655 radians



Statistiques sur l'image tournée de -90 degrés :
Moyenne : 1.6088 radians
= 92.1776 degrés
Variance : 4.3160e-05 radians
Ecart type : 0.0065 radians



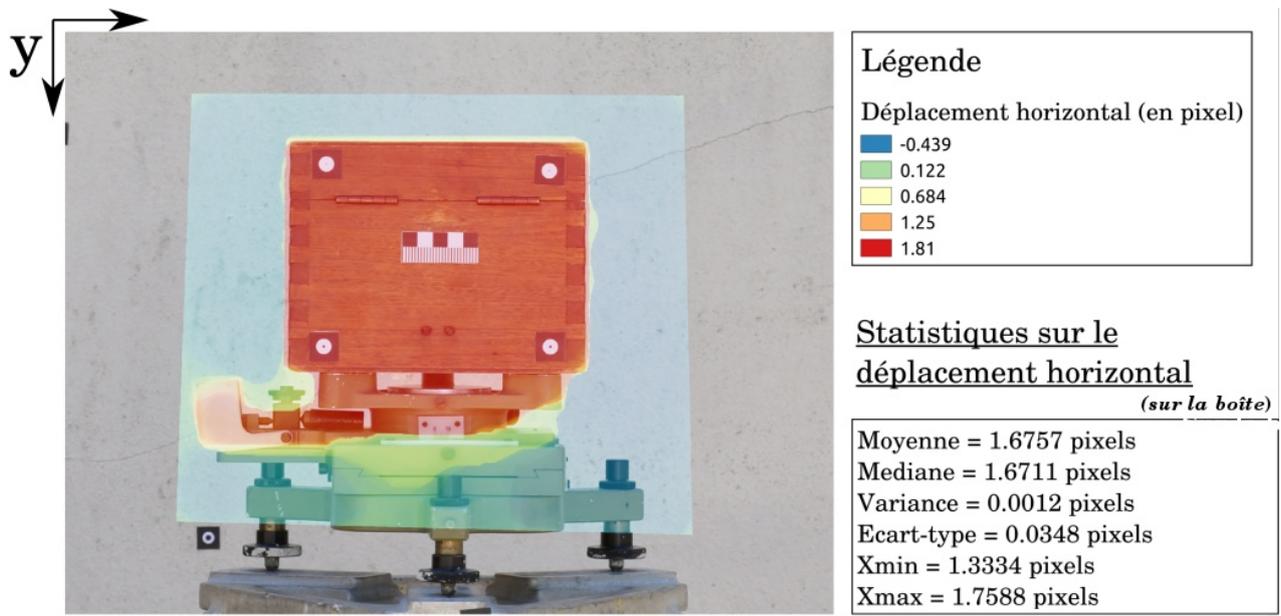
Statistiques sur l'image tournée de 180 degrés :
Moyenne : 0.0384 radians
= 2.2035 degrés
Variance : 5.05271e-05 radians
Ecart type : 0.0071 radians

2.2.3 Boîte

Déplacement de 0,5 mm :

L'échelle fixée sur la boîte présente des graduations en cm et en mm. Elle a permis de faire la conversion des pixels en mm. Ainsi, 49mm correspondent à 224 pixels (le dernier mm étant en blanc, il n'a pas été pris en compte pour le calcul de par l'imprécision de son bord).

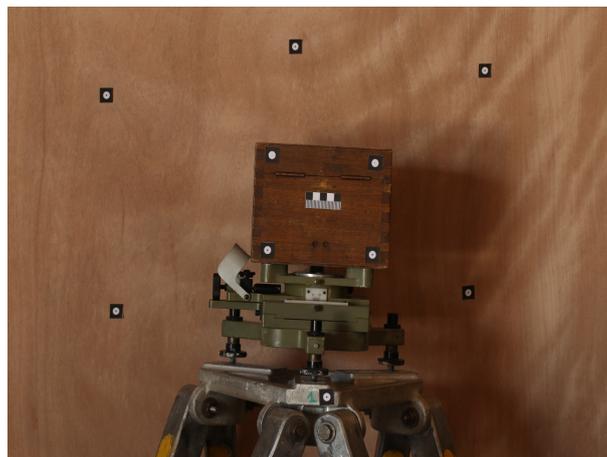
Ainsi, 1 mm = 4.57 pixels et 1 pixel = 0.219 mm.



Les statistiques ont été effectuées sur la boîte à l'aide d'un masque. Si on regarde les résultats obtenus, le déplacement horizontal est en moyenne de 1.67 pixels ce qui correspond à 0.36 mm. On a une erreur de 0.14 mm qui est acceptable au vue du faible déplacement à observer.

Déplacements de 0,1 mm :

Nous cherchons à détecter des mouvements plus fins ce pourquoi nous avons déplacé horizontalement une boîte de 0,1 mm à une résolution de 0,143 mm (par pixel). Sur l'image, nous devons donc trouver un déplacement de $\frac{0,1}{0,143}$, soit 0.7 pixels.



Nous avons analysé le déplacement sur la boîte mobile et vérifier l'immobilité du fond. Les résultats sont en pixels :

Référence	Déplacement	Statistiques sur la boîte		Statistiques sur le fond	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
0	1	0,358	0,024	-0,021	0,006
1	2	0,473	0,024	0,0003	0,010
2	3	0,578	0,031	-0,018	0,009
3	4	0,598	0,034	-0,022	0,007

La photogrammétrie permet effectivement de détecter un déplacement, bien que les résultats s'éloignent quelques peu de la valeur attendue. L'erreur maximale obtenue est de 0,341 pixel, ce qui correspond à 0,049mm.

De ce fait, nous sommes amenés à remettre en cause, soit la précision de la méthode, soit la valeur théorique du déplacement (qualité du vernier de l'embase du pied lourd). Cette dernière option semble plus probable, car nous n'avons aucun autre moyen de contrôle. Nous ne pouvons certifier que le déplacement réalisé, est exactement celui souhaité.

D'autre part, bien que les résultats photogrammétriques soient différents de ceux attendus, ils sont quand même cohérents entre eux : faible écart-type, résultats homogènes sur la boîte. Afin de vérifier la valeur de notre déplacement théorique, nous avons réalisé un scan laser. Cependant, le laser était incapable de détecter un déplacement si faible. Ainsi, à travers cette expérience nous avons eu l'occasion de confronter la photogrammétrie et la lasergrammétrie qui offrent des pistes de recherche.

Seuil de détection du déplacement en pixel :

Dans nos tests précédents, nous avons constaté que nous pouvions détecter des déplacements de l'ordre du demi-pixel. L'idée de cette expérience est de tester la valeur minimale de déplacement en 2D. De ce fait, nous avons repris le test précédent présentant un déplacement calculé de 0,473 px pour une résolution terrain de 0,143 mm soit un déplacement calculé de 0,068 mm. Nous avons donc sous-échantillonné les images afin de réduire le déplacement en pixel, et d'en déduire le seuil de détection d'un déplacement par MicMac.

Image	Déplacement attendu (pixel)		Déplacement calculé (pixel)	
	Boîte	Fond	Boîte	Fond
Initiale		0	0,454	-0,021
Sous Ech. 21%	0,1	0	0,098	-0,014
Sous Ech. 11%	0,05	0	0,04	0,001
Sous Ech. 2%	0,01	0	0,002	-0,02

Nous pouvons remarquer que le déplacement de 0,01 n'a pas pu être détecté. Pour le déplacement théorique de 0,05 pixel, le logiciel a bien détecté une stabilité pour le fond et un déplacement pour la boîte, mais avec une erreur de 0,010 pixel. Enfin, le déplacement de 0,1 pixel est relativement bien reconnu, car l'erreur n'est que de 0,002 pixel.

Image	Ecart-type	
	Boîte	Fond
Initial	0,029	0,022
Sous Ech. 21 %	0,045	0,039
Sous Ech. 11 %	0,033	0,04
Sous Ech. 2 %	0,018	0,045

En ce qui concerne la dispersion des valeurs autour de la moyenne, on peut remarquer que les écarts-type sont relativement faibles (de l'ordre du centième de pixel). Cela témoigne de la cohérence des résultats.

2.2.4 Test grandeur nature sur le pont de Mane :

Un appareil photo fut installé au pied d'un pont sur la route de Mane à Dauphin pour observer sa déformation lors du passage de camions.



L'un de nos résultats fut assez satisfaisant.



Les paramètres choisis sont :

$$\text{Inc} = 1.6$$

$$\text{Szw} = 10$$

$$\text{Regul} = 1.0$$

$$\text{CorrelMin} = 0.85$$

$$\text{GammaCorrel} = 0.3$$

$$\text{SsResolOpt} = 4$$

Statistiques sur le déplacement vertical effectuées avec un masque appliqué sur la zone bleue :

Moyenne : 0,1114 pixels

Variance : 0,0009 pixels

Écart-type : 0,0307 pixels

La déformation est bien visible et tourne autour de 0.11 pixels pour la zone bleue. Pour autant, il faut nuancer ce résultat. En effet, le déplacement obtenu en x est lui aussi assez fort, ce qui peut s'expliquer par l'angle de prise de vue. L'appareil photo n'était pas orthogonal au pont. Le teta est alors en moyenne de 0.89 radians soit un angle de 51 degrés.

Il est difficile de trouver des déplacements fins dans des conditions réelles.

Partie 3

Déplacement observé en 3 dimensions

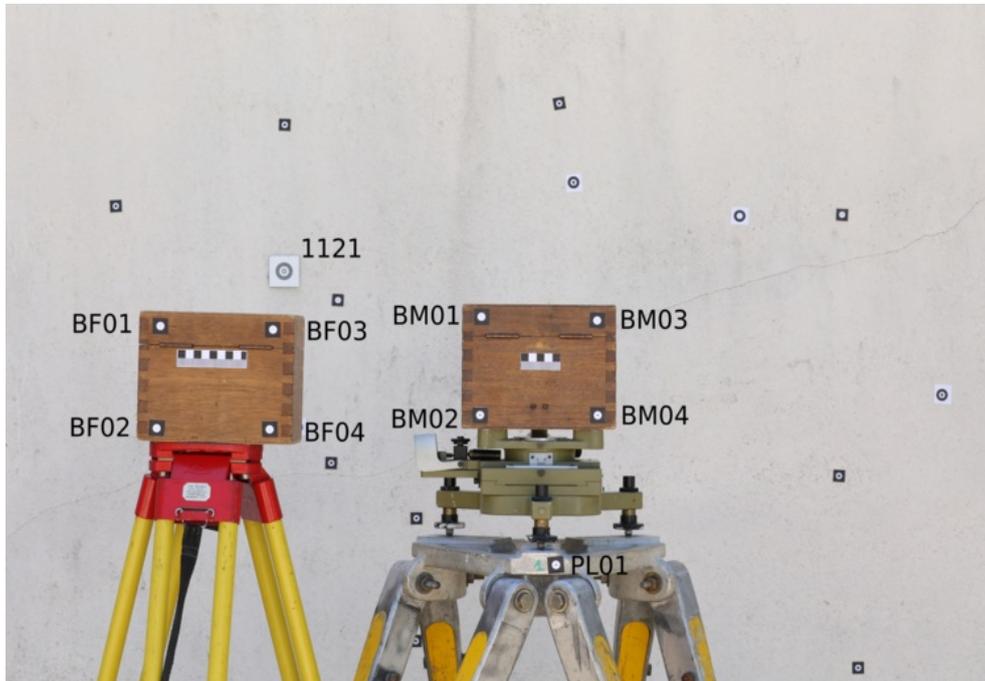
3.1 Principe

Observer une déformation dans les trois directions nécessite un protocole d'acquisition beaucoup plus conséquent. En effet, cela nécessite plusieurs points de vue pour calculer un déplacement en trois dimensions.



Installation : Trois appareils photographiques acquièrent une série d'images ("time-lapse") depuis le même point de vue. Ils ont été disposés de sorte que l'un soit en face de l'objet qui subit la déformation, et les deux autres sur les côtés. Des parasols viennent les protéger de l'exposition au soleil. L'un des appareils photographiques, le MarkIII, est utilisé avec une focale différente pour prendre des photos de l'installation avec un fort recouvrement et permettre l'orientation des trois capteurs principaux.

Les coordonnées des cibles déjà présentes sur le mur sont connues dans un repère local. Nous en avons rajouté pour pouvoir pointer facilement des points visibles sur les différentes photos. Nous avons disposé une boîte qui reste immobile sur un trépied à gauche de l'acquisition. Une boîte qui subit divers déplacements est installée sur un trépied lourd et une embase afin que l'on puisse contrôler son déplacement au mm. Des cibles ont été rajoutées sur chacune des deux



boîtes pour pouvoir obtenir des coordonnées terrain des deux objets (la première boîte étant fixe et peut servir de référence et la seconde boîte posée sur l'embase est mobile).

Il s'agira de géo-référencer notre acquisition afin de connaître la déformation de notre objet dans un repère local.

3.2 Fonctionnement de l'outil

Une fois les données acquises, il faut les orienter et les mettre en référence. Le but est donc dans un premier temps, d'orienter les clichés les uns par rapport aux autres, puis de faire basculer cette orientation dans une orientation métrique contenant le plan du déplacement de la boîte. Pour orienter les photos des appareils photos fixes, des clichés ont été pris de toute la zone autour afin de permettre le calcul de l'orientation (suffisamment de redondance). De même, une calibration des quatre systèmes optiques (70D+67mm, 80D+70mm, 5D+100mm, 5D+35mm) a été faite au préalable.

Mise en place de l'état zéro:

- Recherche de points de liaison avec toutes les photos, commande *Tapioca*
- Mise en référence et orientation des photos à l'aide des calibrations, commande *Tapas*

Géo-référencement :

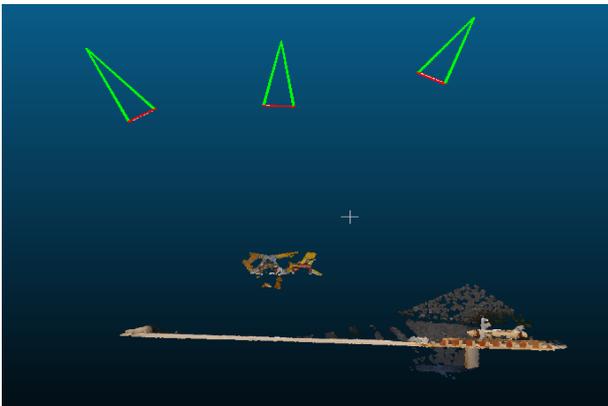
- Mesure de quelques points d'appui, commande *SaisieAppuisInitQT* : trois points sont sélectionnés sur trois images.
- Calcul d'une première similitude 3D et bascule dans la nouvelle orientation, commande *GCPBascule*
- Mesure de tous les points d'appui disponibles sur toutes les cibles géo-référencées du site dans toutes les photos de l'état 0 et de mise en référence, commande *SaisieAppuis-PredicQT*.
- Calcul de la similitude 3D et bascule dans la nouvelle orientation, commande *GCPBascule*



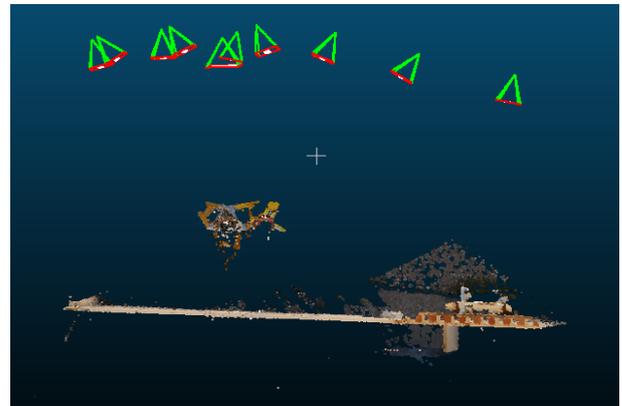
Polygone d'étalonnage du centre avec la position des cibles

- Compensation finale, commande *Campari*

A la fin de cette étape on a une orientation de chaque cliché de l'état0 ainsi que les clichés supplémentaires de mise en référence.



Orientation des prises de vue fixe.



Orientation des prises de vue permettant la mise en référence

Connaissant l'orientation des appareils et prise de vue à l'état zéro et en supposant que les appareils photos ne bougent pas au fur et à mesure de la prise des différents clichés, les orientations calculées à l'état 0 peuvent être utilisées pour tous les autres états.

Mais l'orientation définie est celle du polygone de calibration. Pour avoir un déplacement en x et en y dans le plan de la boîte, il faut donc redéfinir une nouvelle orientation dans le plan de la boîte.

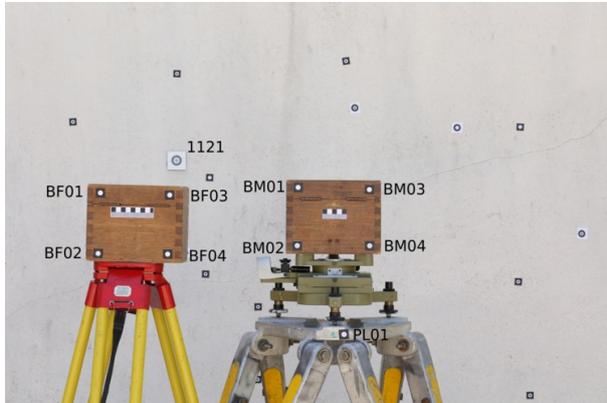
- Calcul de la matrice de rotation et de translation de la similitude 3D dans le plan de la boîte, commande *Bascule*

Le fichier *.xml* obtenu en sortie de *Bascule* contient la matrice de rotation et le vecteur de translation permettant de passer dans la nouvelle orientation définie dans le plan de la boîte. Ainsi en intégrant le produit matriciel de la matrice de rotation avec la matrice de mesure terrain obtenue on peut se replacer dans le bon plan et la bonne orientation lors de la lecture

des fichiers *-S3D.xml.

Nous obtenons par ce fait les coordonnées terrain dans notre orientation métrique de chaque point mesuré dans les images.

Il suffit alors pour chaque état d'ajouter les orientations des différentes prise de vue (en les renommant), les calibrations des appareils et de pointer les cibles créées pour obtenir les coordonnées terrain de nos points à chaque état :



Les photos nécessaires à la mise en référence ne sont plus utiles car on possède déjà l'orientation des photos (comme on considère que les appareils n'ont pas bougé d'un état à l'autre).

Sur la photo ci-dessus, les points créés ont été nommés selon la nomenclature suivante :

- *BFxx* : Boîte Fixe et xx un nombre à deux chiffres
- *BMxx* : Boîte Mobile et xx un nombre à deux chiffres
- *PLxx* : Pied Lourd et xx un nombre à deux chiffres

En sortie de la commande *SaisieAppuisInitQt* et après avoir pointé les 10 cibles on obtient un fichier ...S3D.xml qui donne les coordonnées terrain des différentes cibles à l'état n. En comparant ces coordonnées à celle de l'état 0 on retrouve le déplacement qui a eu lieu entre les deux états.

3.3 Résultats

Les résultats obtenus en sortie sont sous forme d'un tableau comme celui ci-dessous :

Point	dX (en mm)	dY (en mm)	dZ (en mm)
Erreur de stabilité	-0.083	0.004	-0.264
Déplacement moyen	-2.155	-2.020	-0.294
Déplacement moyen corrigé	-2.072	-2.024	-0.030
Valeurs attendues	-2.0	-2.0	0
Erreur sur la moyenne	0.155	0.020	0.293
Erreur sur la moyenne corrigée	0.072	0.024	0.030

Erreur est la moyenne des différences sur les coordonnées des points considérés comme étant fixes entre deux états (points BFxx et PLxx).

Déplacement moyen est la moyenne des écarts des coordonnées entre les deux états mais cette fois sur les points considérés comme mobile (BMxx).

Entre deux états, le déplacement des points de vue est considéré comme nul. Cependant, la présence d'une erreur non nulle et assez significative montre bien que l'appareil se déplace (translation) ou bien qu'il subit une rotation (système de fixation pas assez précis pour de telle niveau de mesure). Un modèle de correction simple est donc de soustraire à notre déplacements

moyen l'erreur mesurée sur les points fixes. Ces valeurs sont celle de *Déplacements moyen corrigé*.

Entre deux états, le déplacement est contrôlé grâce au système de centrage de l'embase, l'échelle associée à celui-ci nous permet d'effectuer des translations horizontales et en profondeur avec une précision du 10ème de mm. Les *Valeurs attendues* sont les déplacements effectués à l'aide des vis de l'embase.

Erreur sur la moyenne représente la soustraction des *Valeurs attendues* et de *Déplacement moyen*.

De même *Erreur sur la moyenne corrigée* est la soustraction de *Valeurs attendues* et de *Déplacement moyen corrigé*.

Les précisions obtenues dans les résultats du tableau ci-dessus sont très satisfaisantes. En effet, après correction on descend à une erreur inférieure au $\frac{1}{10}$ e de mm.

L'analyse des résultats obtenus montre bien dans l'ensemble des mesures que retirer *Erreur* au *Déplacement moyen* améliore les résultats.

Les résultats du tableau ci-dessus font partie des meilleurs résultats obtenus. Ci-dessous, les résultats d'une autre comparaison entre deux états.

Point	dX (en mm)	dY (en mm)	dZ (en mm)
Erreur	0.056	0.006	-0.406
Déplacement moyen	0.094	-4.054	-0.608
Déplacement moyen corrigé	0.039	-4.060	-0.201
Valeurs attendues	0	-4.0	0
Erreur sur la moyenne	-0.0943	0.054	0.608
Erreur sur la moyenne corrigée	-0.039	0.060	0.201

La limite de la correction de l'erreur est ici bien apparente. En effet, malgré la correction de l'erreur on garde une erreur de 0.2 mm sur l'axe Z. Il semblerait qu'en plus d'une légère translation, l'appareil ait aussi subi une rotation. Pour pallier à cette erreur, il aurait fallu recalculer à chaque état l'orientation des trois clichés en utilisant un masque sur la boîte mobile (qui s'est déplacée par rapport aux photos prises pour l'orientation). Ainsi, bien que certains résultats présentent des erreurs, il est notable que l'erreur obtenue reste au-dessous du mm tant que les prises de vue ne subissent pas une translation trop conséquente.

Conclusion

Ce projet de fin de stage fut intéressant par son côté expérimental. L'observation de déformations par photogrammétrie est difficile du fait des nombreuses conditions qu'il faut réunir pour avoir un résultat satisfaisant (rigidité de l'appareil photo lors de la prise de vue, sensibilité à la chaleur, aux ombres, etc.). Pour autant, ce projet a permis de montrer qu'il est possible d'observer de petites déformations par photogrammétrie à contrario de la lasergrammétrie qui ne peut atteindre une telle précision. L'acquisition par photogrammétrie est de plus beaucoup plus rapide et moins chère que la lasergrammétrie et la topométrie.

Au vu de la complexité du fichier *.XML* à s'approprier, nous n'avons pas pu mener nos expérimentations aussi loin que prévu. Il serait intéressant de mener à bien une étude comparative avec les autres méthodes de métrologie et de quantifier la précision des résultats obtenus.

Annexes

- Description du fichier XML : *AnnexeXML.pdf*
- Description et tests des paramètres du fichier XML : *AnnexeParam.pdf*
- Un script python de déformation : *deformation.py*
- Deux scripts python de statistiques sur l'image : *Stat_Images.py* et *Stat_images_un_masque_ts_param.py*
- GIF présentant la déformation d'une image à l'autre due à la chaleur : *Gif_chaleur.gif*