

Rapport du projet de photogrammétrie

Modélisation 3D : Du participatif au relevé de précision
Coralie Leblan, Frédérique Couderette, Anthony Magnetti, Loic Messal

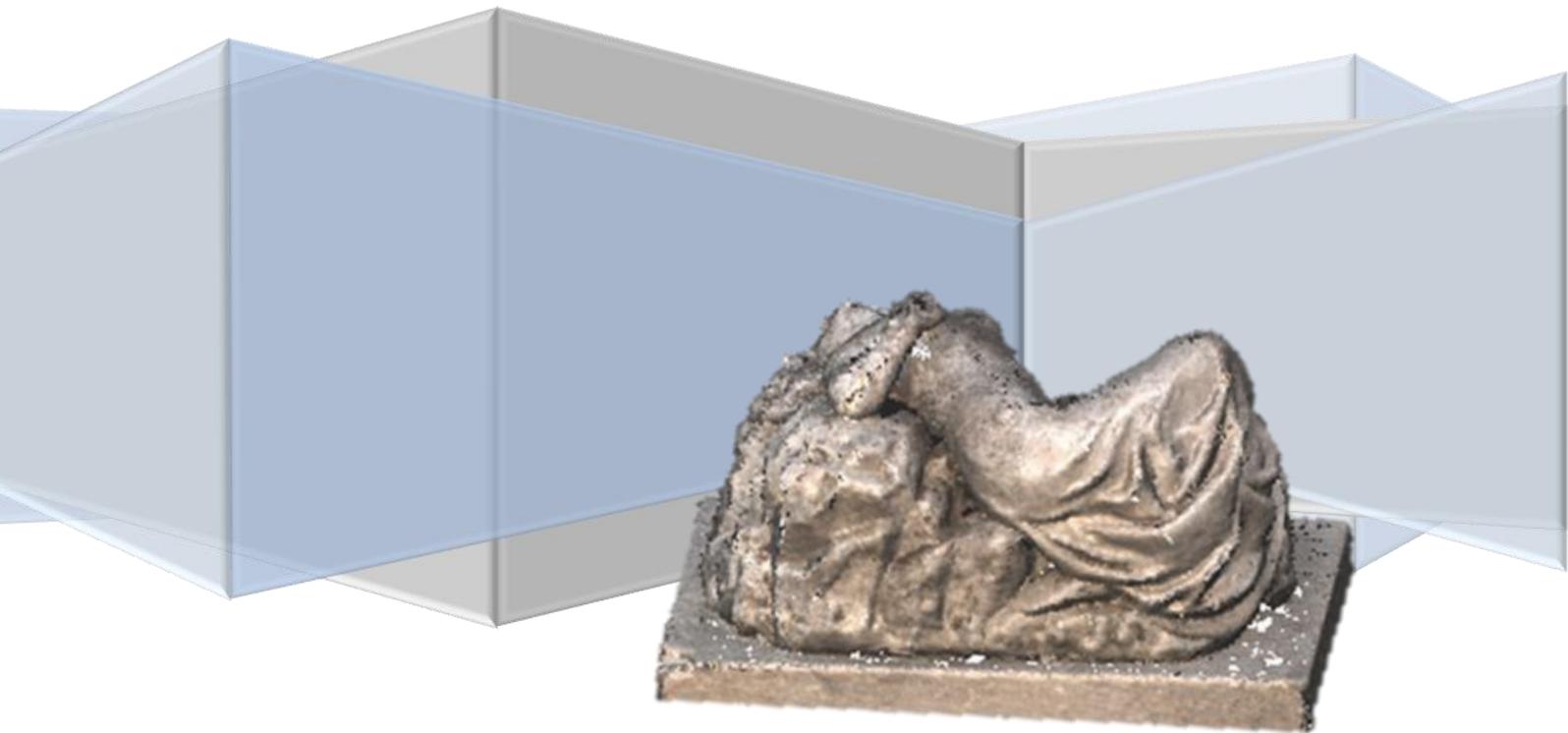


Table des matières

I.	Présentation Générale	3
1.	Le Stage de Fin d'année	3
2.	Forcalquier	3
3.	Le Sujet - Modélisation 3D : du participatif au relevé de précision	3
II.	MicMac : Quelques notions	5
1.	Acquérir ses images : Protocole de Prise de Vue conseillé	5
2.	Recherche de points homologues	5
3.	Calibration de la Caméra et Mise en Place	5
a.	Calibration de la Caméra.....	6
b.	Résolution de la Formule d'Image	6
c.	Contrôle visuel des résultats de l'orientation.....	6
4.	Reconstruction 3D	6
a.	Sélection d'un masque pour restreindre la zone de calcul.....	6
b.	Corrélation	6
III.	La Photogrammétrie Participative	8
1.	Le Projet Mossoul – Un exemple de Photogrammétrie Participative	8
2.	La Démarche de Recherche	9
a.	Reflex, Numérique Compact ou Smartphone ?	9
b.	Présentation des Tests.....	10
3.	La Dame de Candelle – Le Fantôme de la Citerne	10
4.	Obtention d'un Nuage de Points de Référence – Acquisition Laser	11
a.	Définition d'une zone de Sécurité.....	11
b.	Méthode de Lever	11
c.	Le Traitement des Données	11
5.	Comparaison de Nuages de Points - Cloud Compare	12
a.	Le recalage des nuages de points	12
b.	Les Observations	13
6.	Test : Qualité absolue des appareils	14
a.	Mise en Œuvre de l'acquisition.....	14
b.	Observations :	14
c.	Conclusion :	14
7.	Test : Acquisition par Vidéo	15
a.	Méthode d'acquisition	15
b.	Observations	15
c.	Conclusion.....	15

8. Test : nombre de photos minimum nécessaire pour une bonne reconstruction 3D.....	15
a. Qualification de la densité des nuages de Points	16
b. Qualification du taux de reconstruction	17
c. Qualification de la précision des reconstructions :.....	18
9. Test : Influence de l'environnement	20
a. Problématique	20
b. Méthode de traitement	20
IV. La Photogrammétrie terrestre de précision	21
1. La Chapelle Saint Pierre : Un exemple de Photogrammétrie Terrestre de précision	21
2. Enchaînement des opérations techniques de la mission	21
a. Détermination du nombre de clichés utiles.....	21
b. Mise en place de point d'appui et détermination de points de détails.....	21
3. Etat des lieux : Pierrerie	22
a. Les facteurs influençant la position de la caméra.....	22
b. Méthode de calcul	22
c. Résultats.....	22
4. Chantier de précision au centre IGN de Forcalquier.....	24
a. Présentation du polygone d'étalonnage.....	24
b. Gestion des points de liaison et de la compensation	24
c. Le phénomène de dérive	25
V. Conclusion Générale :	29

I. Présentation Générale

1. Le Stage de Fin d'année

La formation théorique, effectuée dans les locaux de Marne-la-Vallée, se voit complétée par un stage terrain de 2 mois, dans la ville de Forcalquier. Ce stage consiste à mettre en application des notions vues au cours de l'année. Les 7 premières semaines sont consacrées à des exercices pratiques supervisés. Les 3 dernières, quant à elles, sont réservées à un projet par groupes de petits effectifs, donnant lieu à une soutenance pour clore ce stage.

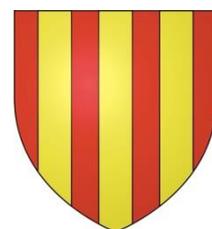


2. Forcalquier

Depuis plus de 50 ans, Forcalquier accueille un centre IGN¹, servant actuellement au stage de fin d'année de l'ENSG².

Forcalquier, ou Forcaquier en occitan, est située dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Elle possède un riche patrimoine architectural, ainsi que plusieurs monuments classés monument historique.

La ville et ses alentours constituent un espace d'intérêt pour les stagiaires de l'ENSG, par ses paysages au relief varié, propices à l'exercice du terrain.



3. Le Sujet - Modélisation 3D : du participatif au relevé de précision

Dans le cadre de la conservation du patrimoine, le projet traité s'intéresse dans une première partie à l'enregistrement d'informations par le grand public. Jusqu'où les photos prises par des touristes peuvent-elles intervenir dans l'archivage numérique de monuments ?

¹ Institut National de l'Information Géographique et Forestière

² École Nationale des Sciences Géographiques

Il s'agit donc de mettre en application la reconstruction 3D à partir de prises de vues avec différents appareils de photographie, accessibles au grand public, ainsi qu'à partir d'un lidar terrestre, puis d'analyser et de comparer les résultats en termes d'efficacité et de précision.

Dans un deuxième temps, le projet s'intéresse à un chantier de précision : quels paramètres influencent la mise en place ? Dans quelle mesure ?

II. MicMac : Quelques notions

MicMac est un logiciel de photogrammétrie permettant de réaliser des nuages de points 3D à partir de photos. Il a été créé par Marc Pierrot Deseilligny, de l'IGN. Bien que MicMac soit considéré comme l'un des meilleurs logiciels de reconstruction 3D, peu de 'recettes' sont connues pour reconstruire un chantier. On commencera par présenter les grandes lignes, étapes nécessaires pour arriver à la modélisation d'un objet dans le meilleur des cas. En effet, MicMac peut avoir du mal à terminer ses calculs et une analyse approfondie de l'erreur des commandes exécutées est nécessaire (précalibration sur un lot d'images par exemple).

1. Acquérir ses images : Protocole de Prise de Vue conseillé

Pour réaliser une prise de vue permettant une reconstruction 3D quasi assurée, il faut tout d'abord prendre les photos les plus nettes possibles (trépied et déclencheur à distance, ou retardateur conseillés). De plus, il faut respecter un recouvrement de 60x40, un éclairage homogène (éviter une surexposition ou une sous-exposition, exclure le flash qui génère des ombres portées) et conserver une focale et une mise au point constantes sur l'ensemble de la prise de vue.

2. Recherche de points homologues

La recherche de points homologues permet de trouver des points qui correspondent au même détail, d'une image à l'autre. Ces points serviront au logiciel à agencer chacune des images par rapport aux autres par correspondance (ils deviendront alors des points de liaison).

```
mm3d Tapioca MulScale ".*JPG" 500 1500
```

Lorsque cette commande est lancée, MicMac parcourt toutes les images JPG du dossier, et pour chacune d'entre elles, recherche les « points communs » avec les autres, grâce à l'algorithme SIFT (Tapioca pour procéder à la recherche de points homologues, MulScale pour la manière de rechercher ces points). Le paramètre MulScale commence par effectuer une recherche sur des images de faible résolution, puis sur des images plus résolues (sous-échantillonnées au tiers). Ainsi il élimine à son premier passage des recherches fines inutiles entre des images qui n'ont pas de points communs, et permet ainsi de gagner du temps. On obtient, à la fin de cette procédure, l'ensemble des points homologues.

3. Calibration de la Caméra et Mise en Place

Pour restituer la 3D à des images, il est important de connaître les caractéristiques de l'appareil photo au moment de la prise de vue (étape de calibration de la caméra). A partir de ces éléments, auxquels sont ajoutés l'ensemble des points de liaisons et des images, on peut déterminer la position et l'orientation de l'appareil photo pour chacun des clichés (résolution de la formule d'image). C'est la mise en place.

```
mm3d Tapas RadialStd ".*JPG" Out=MEP
```

a. Calibration de la Caméra

La distorsion est un phénomène lié aux éléments physiques de l'appareil, qui se traduit par une déformation de la géométrie réelle des objets, pour une focale et une mise au point données. On peut corriger cette distorsion à l'aide d'un modèle polynomial ($dr = ar^3 + br^5 + cr^7$ avec dr : la distorsion ; a, b, c : les coefficients du polynôme et r : la distance entre le point principal de symétrie et le pixel considéré), c'est ce que fait MicMac RadialStd en déterminant les coefficients de distorsion, ainsi que d'autres paramètres comme la focale, la position du point principal de symétrie (PPS) et du point principal d'auto collimation (PPA).

b. Résolution de la Formule d'Image

La formule d'image relie les coordonnées image d'un pixel à ses coordonnées terrain. La formule dépend de plusieurs paramètres : un vecteur F derrière lequel se cachent les éléments calculés lors de la calibration ; une matrice de rotation R traduisant l'orientation de la caméra ; un vecteur S traduisant la position de la caméra. Résoudre la formule d'image grâce aux points homologues permet de déterminer la position et l'orientation relative des caméras au moment de la prise de vues.

c. Contrôle visuel des résultats de l'orientation

Cette étape permet d'afficher la position et l'orientation de la caméra, pour contrôler la mise en place, et de générer un nuage de points à partir de ces paramètres.

```
mm3d AperiCloud "*.JPG" Ori-MEP
```

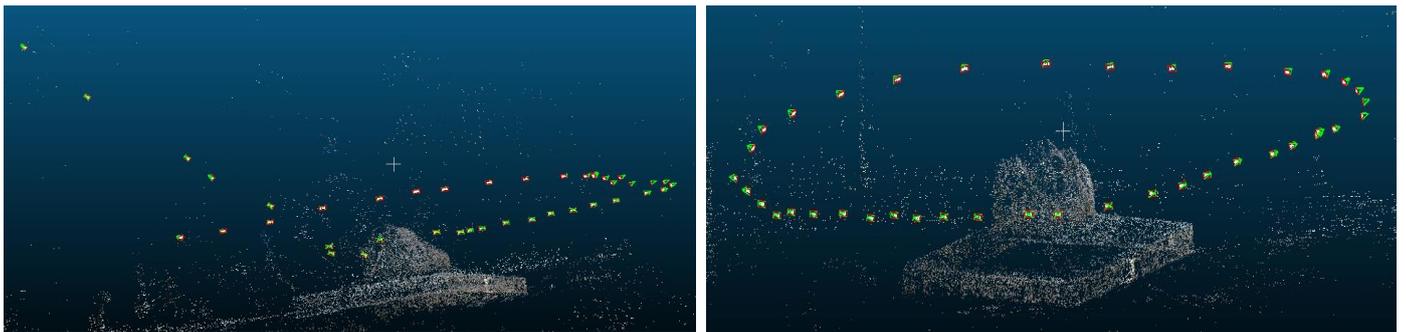


Figure 1 : Exemple d'un contrôle qui a permis de détecter un problème de mise en place (en l'occurrence une image floue qui faisait diverger la mise en place)

4. Reconstruction 3D

a. Sélection d'un masque pour restreindre la zone de calcul

Les calculs de corrélation dense sont longs et dépendent du nombre de points à prendre en compte. Une fonction MicMac permet de ne sélectionner que la partie intéressante à reconstruire.

```
mm3d SaisieMasqQt AperiCloud_MEP.ply
```

b. Corrélation

```
mm3d C3DC MicMac "*.JPG" Ori-MEP/ Masq3D=AperiCloud_MEP_selectionInfo.xml
```

Cette dernière commande permet de générer automatiquement un nuage de points 3D. Le principe est de partir d'un pixel d'une image dite maitresse et de tracer une demi-droite partant de ce pixel et passant par le sommet de prise de vues. Ensuite, parcourir cette demi-droite et relier chaque avancée du parcours aux autres images en tra-

çant le segment partant de l'avancée du parcours, passant par les sommets des autres prises de vues et s'arrêtant sur le plan image. Finalement la vignette de l'image maîtresse et les vignettes des pixels rencontrés par projection sont comparées et permettent d'obtenir une courbe de corrélation en fonction de la distance parcourue. Le point reconstruit est celui correspondant à l'extremum de la courbe de corrélation. Enfin, cette procédure est réitérée pour chaque pixel de l'image maîtresse. Une nouvelle image devient alors l'image maîtresse, jusqu'à parcourir toutes les images. Pour conclure, la corrélation dense permet de placer tous les points dans l'espace à l'aide de toutes les images.

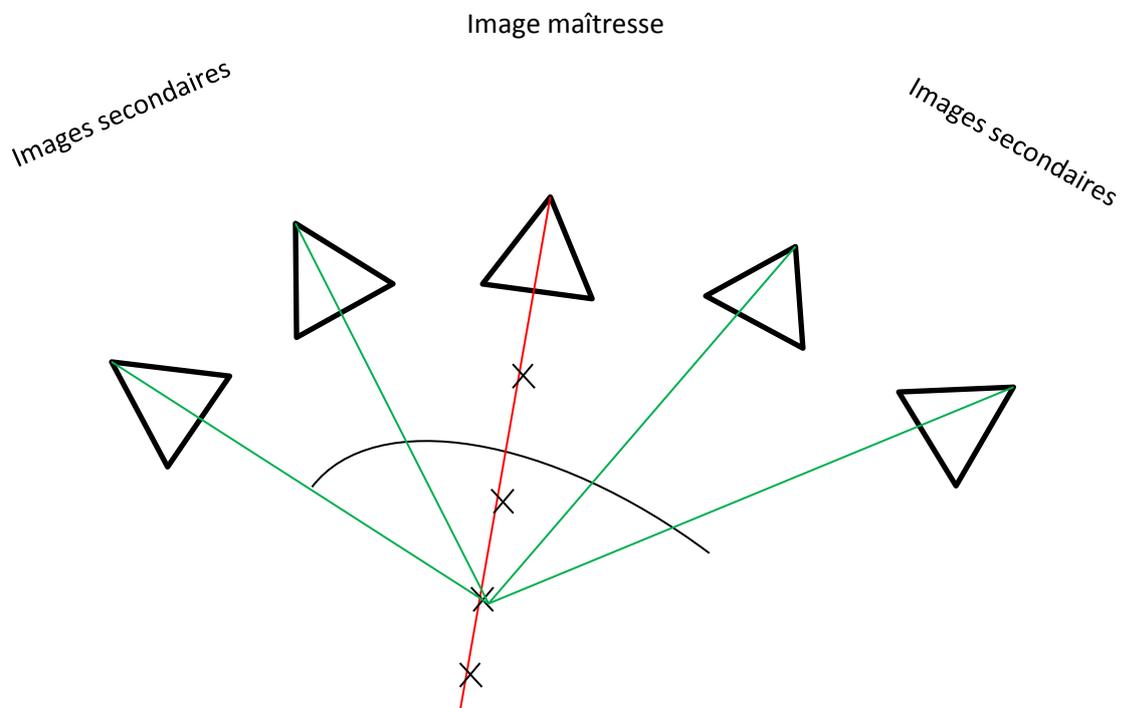


Figure 2 : Principe de la corrélation dense

III. La Photogrammétrie Participative

1. Le Projet Mossoul – Un exemple de Photogrammétrie Participative

« Project Mosul »

C'est à la suite de la diffusion d'une vidéo, montrant la destruction d'œuvres d'art du musée de Mossoul en Irak par l'organisation État Islamique, que trois étudiants chercheurs au sein du Réseau de formation pour le patrimoine culturel numérique (un programme financé par la Commission Européenne), Matthew Vincent, Chance Coughehour et Marinos Loannides ont décidé de lancer un site internet destiné à recréer ces œuvres en 3D : « **Project Mosul** » www.projectmosul.org



PROJECT MOSUL

« C'est une initiative culturelle spontanée, mondiale et fulgurante, à l'image du XXIe siècle numérique.

Le « projet Mossoul » est un musée virtuel en construction pour réagir à la barbarie des destructions

d'œuvres d'art assyrien du musée irakien de Mossoul. Ce projet en 3D, lancé en ligne le 8 Mars, en appelle à la foule des internautes. Il s'agit d'obtenir tout autant des images des œuvres qui étaient exposées au musée que de l'aide en ligne provenant d'experts en patrimoine ou en programmation informatique. »

« **Projet Mossoul** », un musée virtuel pour réagir face à la barbarie de l'Etat Islamique – Le Monde – 17.03.2015

Un Projet Participatif

Pour pouvoir recréer ses œuvres en 3 dimensions par photogrammétrie, les chercheurs ont besoin de récupérer des photos numériques ou des scans de clichés analogiques.

Or, cela n'est pas chose simple, car le musée de Mossoul a fermé ses portes au public depuis 2003, début de la guerre en Irak.

Les scientifiques ont donc utilisé un moyen de communication bien connu pour lancer un appel aux internautes du monde entier : **Facebook**



Comment les internautes peuvent-ils participer ?

Tous ceux qui détiennent des photos peuvent les faire parvenir par le biais du site web du projet

Aide au tri et à l'étiquetage des photos

Traitement et encodage des photos

L'avantage de ce projet est double : "Il permet d'identifier les éléments pillés et de recréer les œuvres détruites" expliquent les chercheurs. En effet, si les sculptures les plus grosses ont été détruites, de nombreuses pièces plus petites ont été dérobées et se retrouvent sur le marché noir, alimentant un commerce fructueux pour l'État Islamique. Leur identification permettrait de les saisir en vue de leur restitution

Ce projet explicite toute la puissance de la photogrammétrie, qui grâce à de simples photos peut faire renaître des œuvres détruites. Cela serait impossible sans la contribution de milliers d'internautes.

Aujourd'hui, il est difficile de réunir des photographies exploitables car le « Grand Public » n'envisageait pas, lorsqu'il prenait des photos, que ces dernières pourraient servir dans un cadre de reconstitution 3D, n'ayant de plus connaissance d'aucun protocole de prise de vue. Ce projet innovant souligne l'importance du participatif.

Maintenant que la prise de conscience a eu lieu, il est intéressant d'essayer de mettre au point un protocole.

2. La Démarche de Recherche

Le but de l'étude est de déterminer un protocole de prise de vue adapté au « Grand Public », permettant de fournir des informations utiles à une reconstitution 3D précise, ainsi que de tester des protocoles d'acquisition.

Tout d'abord, la photogrammétrie permet principalement d'obtenir un nuage de points en 3 dimensions à partir de photographies. Ainsi, il faut tenter d'adapter un protocole au type d'appareil photographique utilisé par le « Grand Public », en commençant par les identifier.

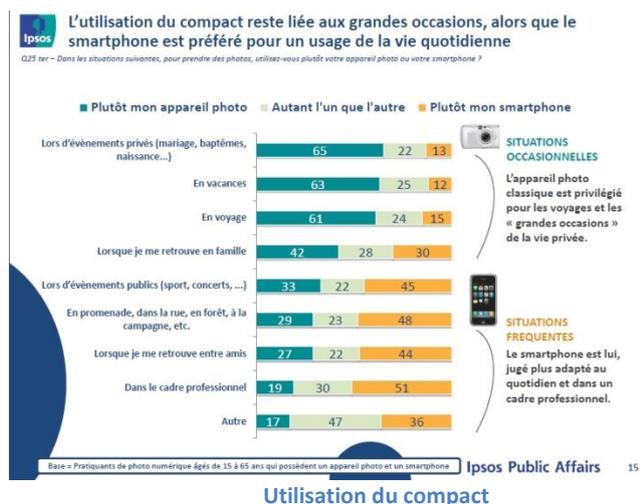
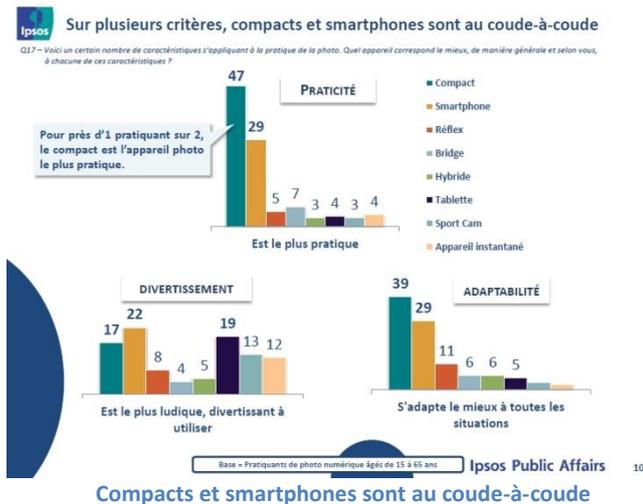
a. Reflex, Numérique Compact ou Smartphone ?



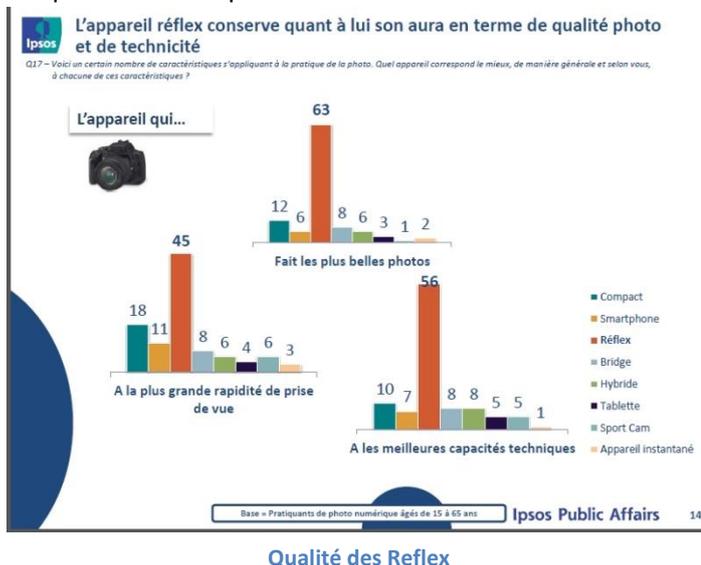
Selon un sondage Ipsos réalisé en 2014, en matière de photographie, les français sont autant équipés en smartphone qu'en compact (74% et 72%).

A l'inverse, seulement 22% d'entre eux possèdent un reflex, jugé plus compliqué en termes d'utilisation.

Sur de nombreux critères, ces deux appareils sont coude à coude, même si dans le cadre qui nous intéresse, le compact reste le plus utilisé.



Pourtant, et toujours d'après les sondés de cette étude Ipsos, le reflex dépasse de loin les autres appareils en termes de qualité et de capacité.



En conclusion :

Il ressort de cette étude que même si l'utilisation de smartphone se fait de plus en plus fréquente, celle des appareils numériques compacts et des reflex est prépondérante pour des questions de qualité.

Même si un test de reconstitution 3D sera fait à partir d'un smartphone, le protocole se concentrera sur les deux autres types d'appareils.

b. Présentation des Tests

Quel appareil pour quel objectif ?

L'étude se basera sur les appareils de type reflex, compact et smartphone.

La photogrammétrie peut permettre des reconstitutions 3D plus ou moins précises. Dans le cadre de la photogrammétrie participative, les attentes peuvent être différentes : en ce qui concerne le projet Mossoul par exemple, le but principal est de reconstruire des œuvres détruites, mais jusqu'à quel point ?

Si le reflex est unanimement supérieur en qualité à un compact ou un smartphone, est-il nécessaire, lorsque le but recherché n'est que visuel ?

Un premier test consiste à comparer le rendu visuel d'une reconstitution 3D pour chacun des types d'appareils ; un second à comparer la précision des nuages de points obtenus pour chacun de ces appareils.

(Le terme de précision sera expliqué par la suite)

Des photos à quelle fréquence ?

L'une des premières étapes de la mise en place en photogrammétrie est la détection de points homologues entre les images. Cela signifie que les clichés doivent respecter un certain recouvrement. En général, il est conseillé de tourner autour de l'objet et, plus il y a d'images, plus le recouvrement est important. Mais à partir de quelle valeur peut-on l'estimer suffisant ?

On tentera de déterminer une valeur minimale de l'angle nécessaire pour une reconstitution 3D satisfaisante.

Des images compressées ou non ?

Le matériel à disposition permettait d'effectuer des prises de vue sous 2 formats : JPG et CR2. Le format JPG est un format de compression avec pertes, c'est-à-dire que la qualité est mise à mal par l'occupation de mémoire : elles représentent un bon compromis espace utilisé/qualité. Le format CR2, quant à lui, est non compressé et occupe donc plus d'espace, mais toute l'information enregistrée est sauvegardée.

Concernant le sujet étudié, une qualité maximale est préférable : on peut donc comparer la différence de qualité entre les 2 formats : l'un, quotidiennement utilisé lors des prises de vue, l'autre peu connu du public.

Une influence de l'environnement ?

Comment MicMac gère-t-il l'environnement autour d'un objet, par exemple une foule de tourisme, un arbre en plein vent... ? S'en sert-il comme points de liaisons ou bien les exclut-il des calculs ?

Marche à suivre pour effectuer les tests :

- Déterminer un objet d'étude de petite taille.
- Générer un premier nuage de points issu d'un lever au scanner laser 3D, qui servira par la suite de référence.
- Générer plusieurs nuages de points correspondant aux différents tests que l'on souhaite effectuer.
- Conclure par la mise en place d'un protocole de prise de vue adapté au grand public.

Etudier un objet de petite taille est un choix motivé par des raisons :

- stratégiques (temps passé sur le terrain et de calculs diminués)
- logiques (dans la logique du projet Mossoul, la reconstitution 3D s'articule autour de petits objets)

3. La Dame de Candelle – Le Fantôme de la Citerne

Située dans le centre-ville de Forcalquier, juste en face de l'office de tourisme, cette statue trouve son origine dans les légendes locales. Pendant longtemps, ses habitants ont cru voir aux abords de la « Source du Rocher », le fantôme d'une femme hanter les lieux : Canèla ou encore Candèla était invoquée pour faire peur aux enfants et pour les garder à distance de la Citadelle...

Le lectionnaire enchanté, à la découverte du patrimoine de Forcalquier



4. Obtention d'un Nuage de Points de Référence – Acquisition Laser

En photogrammétrie, les nuages de points en 3 dimensions sont issus de photos en 2 dimensions. Qualifier un nuage revient alors à évaluer la précision de ses points par rapport à un nuage de référence précis (et de précision connue). Un lever de la « Dame de Candelle » a été effectué au moyen d'un scanner laser afin d'obtenir un nuage de points le plus dense possible. De plus, le lidar a l'avantage d'ajouter la métrique au nuage de points.

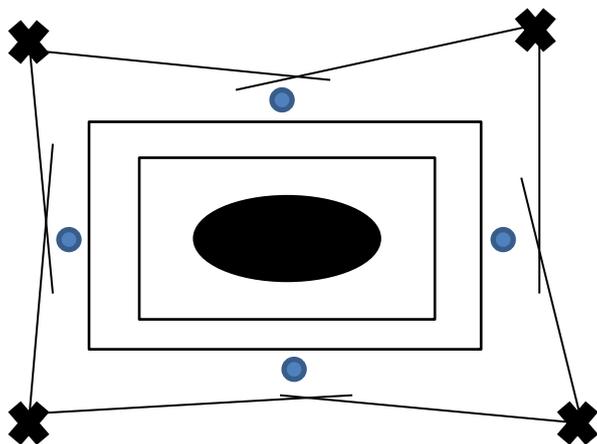
a. Définition d'une zone de Sécurité

Étant au cœur d'une zone extrêmement touristique, le laser peut être dangereux pour qui n'est pas vigilant. De plus, les passages fréquents de touristes aux abords de la « Dame de Candelle » risquaient d'être nuisibles au lever. Il a donc fallu définir un périmètre autour de la zone de travail pour garantir la sécurité de tous, ainsi que la qualité du lever.

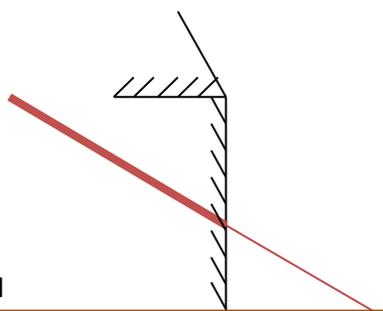
b. Méthode de Lever

Le but étant d'obtenir un nuage de points de toute la statue, 4 stations ont été effectuées en ses angles, ceci pour garantir un certain recouvrement et l'acquisition de tous les détails.

Afin de prévoir la superposition de plusieurs nuages de points réalisés depuis des positions différentes autour de la statue, 4 boules de céramique, statiques, sont placées autour de la « Dame de Candelle », approximativement au centre de chaque côté : ainsi, les 4 boules sont visibles depuis chaque station.

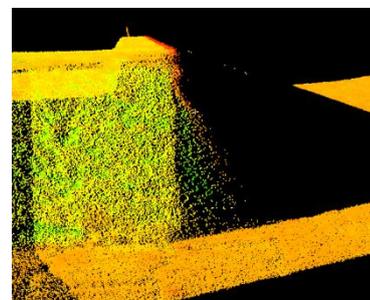


c. Le Traitement des Données



Le laser comporte un certain défaut : lors de l'acquisition de points rasants, l'épaisseur du rayon peut causer l'apparition de points parasites sur le nuage de points (une partie du rayon touche le bord, l'autre continue en ligne droite jusqu'à toucher le sol).

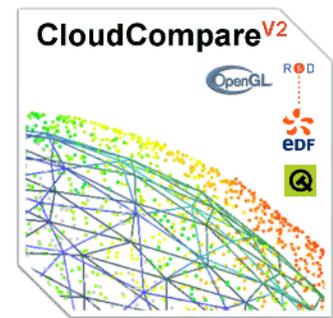
Il est donc nécessaire, lors du traitement, de nettoyer le nuage, c'est-à-dire de supprimer ces points.



5. Comparaison de Nuages de Points - Cloud Compare

Le calcul d'un nuage de points sur Micmac se fait dans un repère local. Ainsi les nuages de points obtenus lors des différents tests sont chacun dans des repères différents.

Or pour pouvoir comparer ces nuages et les qualifier les uns par rapport aux autres, ils doivent être exprimés dans un repère unique. Intervient alors le logiciel Cloud Compare.



C'est un logiciel d'édition et de traitement de nuages de points 3D. Le projet, démarré en 2003, avait pour but principal de permettre la détection rapide de différence entre des nuages de points 3D denses issus de relevés laser effectués dans des complexes industriels ou sur des chantiers de construction. Il a ensuite évolué vers une plateforme plus générale d'édition et de traitement de données 3D. Désormais, c'est un projet indépendant, libre et gratuit.

a. Le recalage des nuages de points

Deux nuages de points 3D sont chargés dans le logiciel :

- L'un sera choisi comme référence
- l'autre comme objet d'étude.

Le but est de les exprimer dans un repère unique.

Premier Recalage Grossier

CloudCompare doit tout d'abord calculer une similitude 3D (Translation, Rotation, ainsi qu'un facteur d'échelle) pour transformer le nuage étudié dans le même repère que le nuage de référence.

Au minimum, quatre points de liaison grossiers communs aux deux nuages lui sont nécessaires (Figure 3)

La similitude déterminée, le logiciel bascule le nuage d'étude qui se superpose grossièrement au nuage de référence. (Figures 5 et 6)

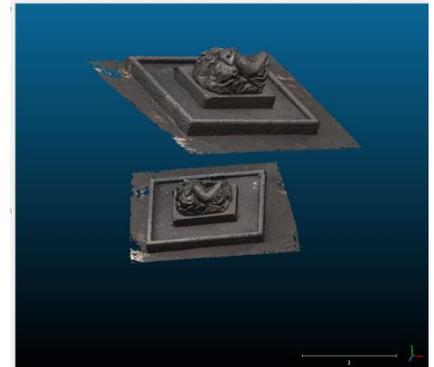


Figure 3 : nuages non recalés

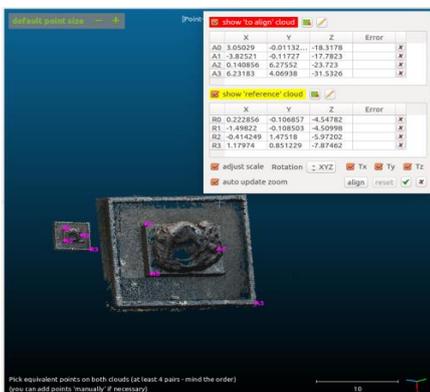


Figure 4 : Points de liaison

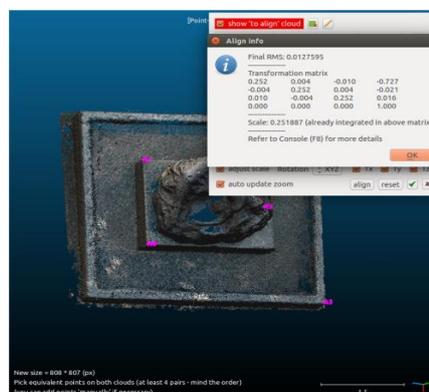


Figure 5 : Matrice de la transformation

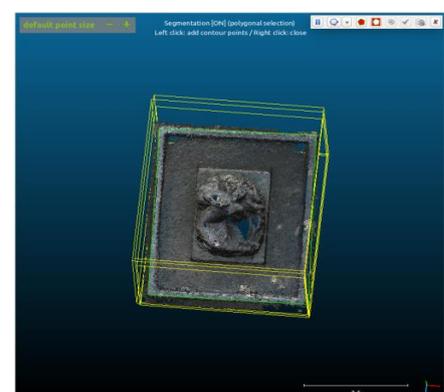


Figure 6 : Nuages recalés grossièrement

Deuxième Recalage Fin

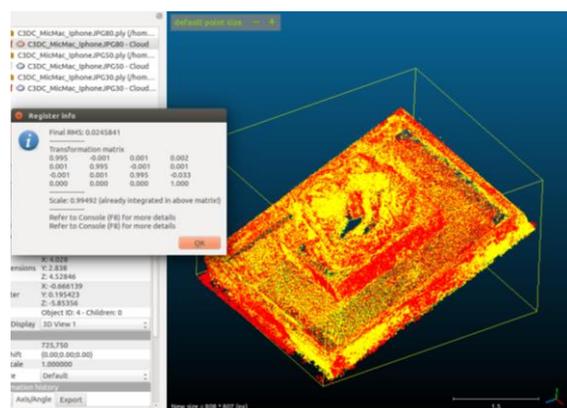


Figure 7 : Recalage fin

Une fois les deux nuages superposés, une fonction permet de les recalcr l'un par rapport à l'autre plus finement, grâce à l'algorithme « ICP » (Iterative Closest Point), qui détermine une seconde similitude 3D plus précise, basée sur l'ensemble des points.

Un nouveau basculement a lieu et les nuages sont alors référencés dans un repère unique. (Figure 7)

b. Les Observations

Pour qualifier les nuages de points 3D, les observations suivantes sont intéressantes:

- Un calcul d'écart entre les nuages ;
- Une gaussienne sur la répartition des distances et ses paramètres.

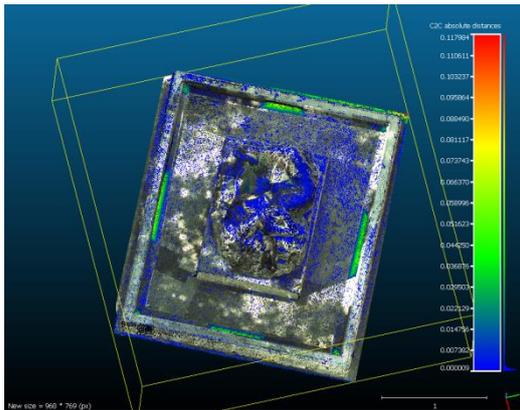


Figure 8 : Calcul de Distance

Le Calcul de distance

Une fois les nuages de points de 2 jeux différents superposés finement, CloudCompare peut évaluer les écarts de distance entre les points des 2 nuages et les coloriser en fonction de la distance calculée.

Etude des Gaussiennes :

Les deux gaussiennes suivantes sont issues de tests faits avec des jeux de photos prises avec un iPhone.

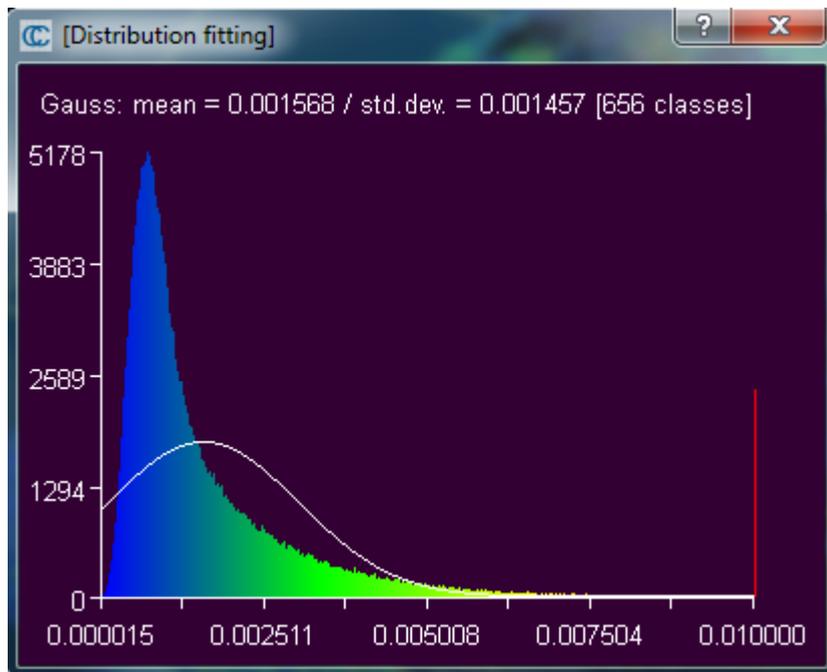


Figure 9 : Comparaison de la distance entre le laser et l'iphone4

Rappels

Une Espérance correspond à la valeur moyenne des écarts (dans le cas présent de distances) entre le nuage étudié et le nuage de référence.

Un Ecart-Type traduit la dispersion de ces valeurs par rapport à la moyenne.

6. Test : Qualité absolue des appareils

Pour ce test, le nuage de points laser, apportant la métrique aux données, est pris comme référence. Une comparaison peut alors être effectuée entre les différents appareils photos.

a. Mise en Œuvre de l'acquisition

Une session de prise de vues avec les appareils à disposition a été mise en place pour l'acquisition suivant un protocole simple pour se mettre en situation de participatif.

- Un reflex (Canon)
- Un compact (Sony)
- Un smartphone (Iphone4),

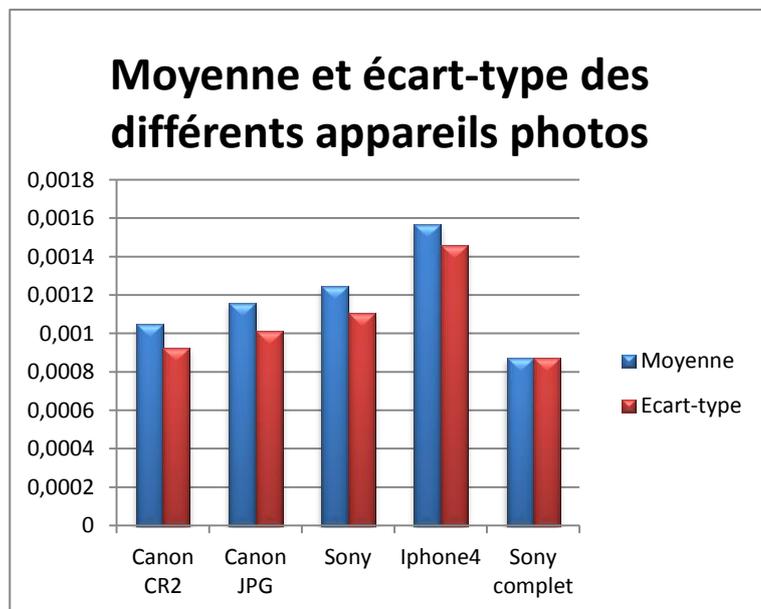
A partir du reflex et du smartphone, une série de 80 clichés a été prise en tournant grossièrement autour de l'objet. (Pour le reflex, chaque clichés a été enregistré au format JPG et CR2)

A partir de l'appareil compact, 80 clichés ont également été pris mais ont été répartis sur deux cercles, un « éloigné » et un autre plus proche permettant de photographier des éléments peu visibles de la statue. Le but étant de tenter d'avoir un jeu de clichés plus complet.

b. Observations :

Deux analyses pour l'appareil compact apparaissent sur le graphique ci-dessous. Elles correspondent chacune :

- Sony : Jeu d'environ 60 clichés pris de façon similaire au reflex et au smartphone (« cercle éloigné »)
- Sony Complet : Jeu de 80 clichés réunissant les deux cercles



- La reconstruction 3D issue des images CR2 du Canon est de meilleure qualité.
- Les résultats du Sony sont compris entre ceux du reflex et du smartphone.
- Les différents appareils n'accusent que de faibles écarts de résultats entre eux (1mm au maximum).
- L'appareil de type smartphone (iPhone) n'accuse que de faibles écarts avec le modèle le plus précis (0.5mm).
- Les résultats du « Sony Complet » améliore la qualité des résultats qui deviennent même jusqu'à 0.02mm plus précis que le reflex

c. Conclusion :

Les deux premières observations permettent de valider les résultats. En effet, pour des jeux de données similaires, il était prévisible que la précision des reconstructions 3D obtenues soit décroissante en suivant l'ordre de comparaison du graphique.

Cependant, nous pouvons souligner que les précisions des différents nuages de points n'accusent que de faibles écarts par rapport au nuage obtenu par lasergrammétrie. Le nuage de point du smartphone, appareil le moins rigoureux des trois utilisés, n'est moins précis que de 1.6 mm par rapport au nuage du laser et que de 0.5mm par rapport à celui du Canon. Une conclusion s'impose donc : dans le cadre d'un projet participatif, un appareil de type smartphone pourrait concurrencer un appareil de type reflex.

Enfin, les observations faites des résultats obtenus à partir du jeu complet fait avec l'appareil de type compact permettent de mettre en avant qu'un appareil moins performant, avec une méthode de prise de vue adaptée peut fournir des résultats équivalents voire même meilleurs qu'un autre appareil considéré efficient.

En conclusion, des appareils de types compacts ou smartphones sont tout à fait adaptés à une reconstitution 3D dans le cadre d'un projet participatif. Il ne faut pas néanmoins oublier de recouvrir le plus l'objet d'étude au mieux pour pouvoir multiplier les points de liaisons et améliorer la mise en place

7. Test : Acquisition par Vidéo

Une vidéo est un moyen rapide d'enregistrer des données sur un objet. Serait-il possible de s'en servir comme moyen d'acquisition ?

a. Méthode d'acquisition

Une vidéo a été réalisée autour de la statue. Les frames de cette dernière ont été extraites et ont servies à essayer de reconstruire un nuage de point 3D

b. Observations

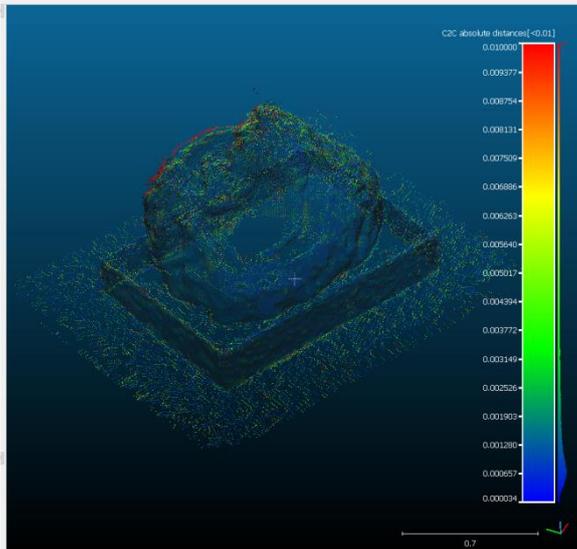


Figure 10 : Calcul des écarts

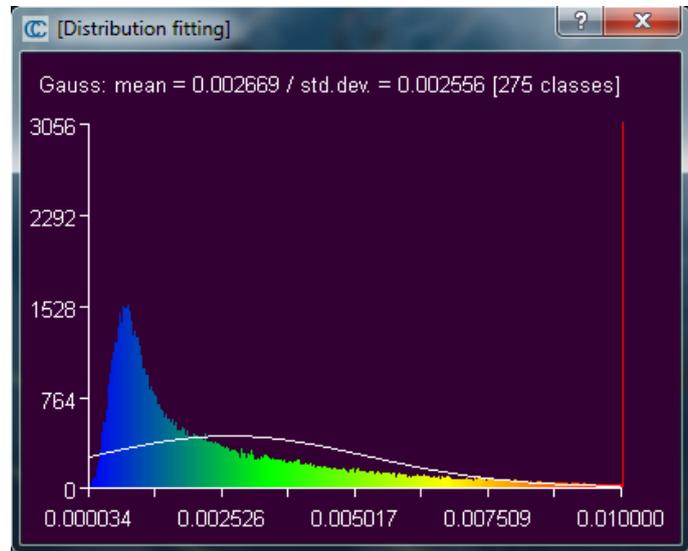


Figure 11 : Comparaison de la distance entre le laser et la vidéo

Sur les graphiques ci-dessus, nous pouvons faire les deux observations suivantes :

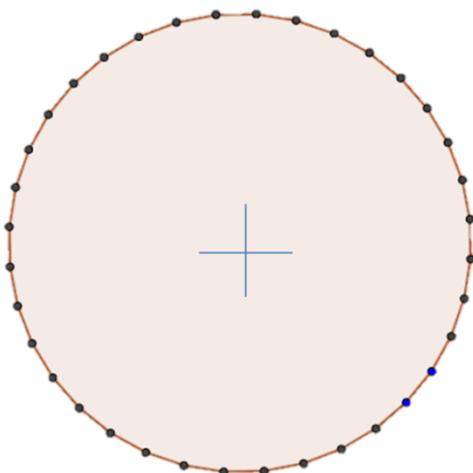
- Visuellement, le nuage est peu dense (En réalité ; 75000 points reconstruits seulement soit 10 fois moins qu'avec les tests précédents).
- Sur la courbe de gauss présentée sur le deuxième graphique, il apparaît que le nuage de point obtenu par « vidéogrammétrie » est peu précis par rapport au nuage obtenu par lasergrammétrie. Il y a en moyenne un écart de 2.6 mm entre les points de ces deux nuages.

c. Conclusion

Il ressort de cette étude qu'une acquisition par vidéo entraîne l'obtention d'un nuage peu dense et peu précis. Cela peut s'expliquer par le mouvement de la caméra qui entraîne des effets de flou sur certaines frames. Si le logiciel est assez robuste pour reconstruire des points, il ne peut pas déterminer suffisamment de points homologues pour assurer une bonne mise en place.

En conclusion, la vidéogrammétrie ne permet pas d'obtenir de reconstitution 3D assez dense ni précise. Cependant la rapidité d'acquisition qu'elle procure est intéressante et cette méthode deviendrait exploitable si l'on parvenait à maîtriser le flou sur les frames.

8. Test : nombre de photos minimum nécessaire pour une bonne reconstruction 3D



Une règle empirique indique qu'une bonne reconstruction est possible avec des images écartées de 10° . Il était alors nécessaire de vérifier cette règle pour établir des contraintes sur le protocole d'acquisition.

Pour cela, il fallait faire une acquisition avec des angles inférieurs à 10° autour d'un objet et de trouver un moyen de qualifier et comparer les résultats.

Mise en œuvre de l'acquisition :

Un rapporteur de 3m de diamètre comprenant 195 graduations (soit environ 1.8°) et centré sur la statue de Forcalquier a été tracé au sol. Puis des photographies ont été effectuées, avec un appareil reflex sur trépied, centré sur chacune des graduations, avec des réglages fixes, cela pour limiter d'éventuels éléments perturbateurs à la reconstruction.

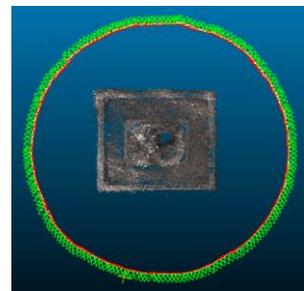


Figure 12 : Mise en place de toutes les images

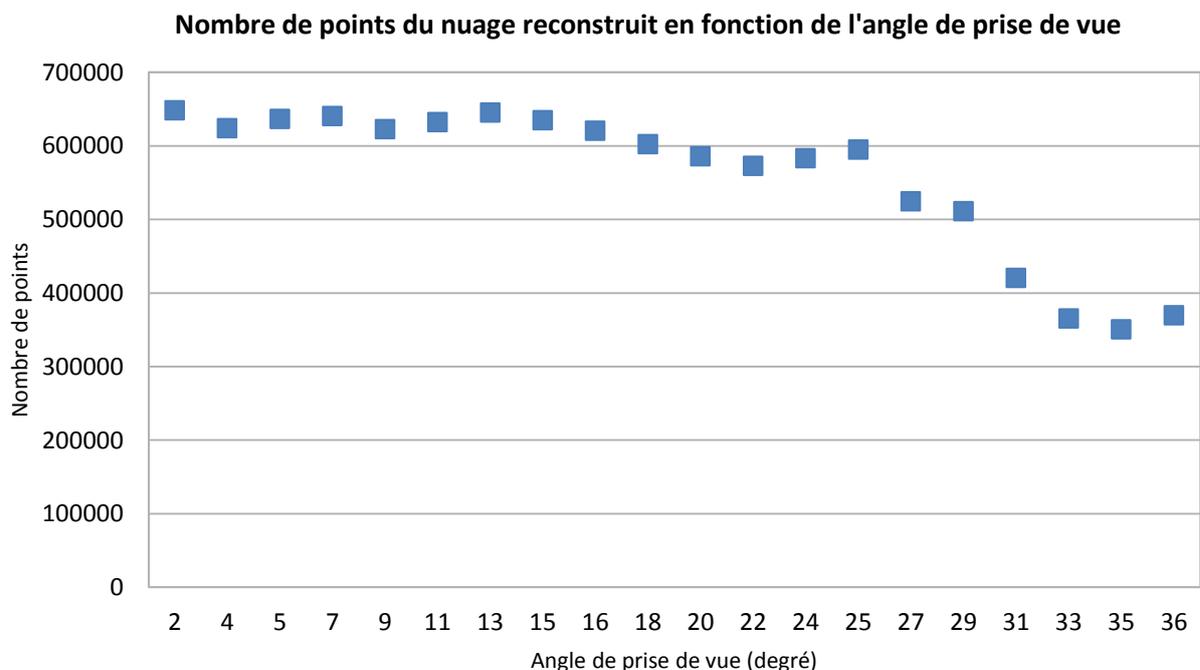
Traitement des données :

Pour déterminer un angle limite entre deux clichés permettant d'obtenir une reconstitution 3D précise, des comparaisons ont eu lieu entre le nuage de point obtenu par lasergrammétrie et ceux obtenus en considérant :

- Toutes les image (1.8°),
- Une image sur deux (3.6°),
- Une image sur trois (5.5°), etc...

Un premier calcul a permis de déterminer les points homologues sur l'ensemble des images (environ 4h de calcul) puis ces derniers ont été propagés dans chacun des répertoires. Les différents nuages de points sont alors calculés et comparés au nuage obtenu par lasergrammétrie.

a. Qualification de la densité des nuages de Points



Les taux de reconstructions des différents nuages obtenus sont rassemblés dans le graphique suivant :

Observation : Une rupture de pente nette apparaît pour un angle de prise de vue correspondant à 26° environ. En effet, 600000 points sont reconstruits pour un angle de 26° contre un peu plus de 500000 pour un angle de 28° soit une perte de 100000 points pour 2°.

Conclusion :

Il apparaît clairement que l'angle entre deux clichés influence fortement la densité du nuage de point. Ici, il semblerait qu'il faille respecter un angle maximum de 26° entre deux prises de vue pour que Micmac puisse déterminer un nombre suffisant de points homologues entre les clichés.

b. Qualification du taux de reconstruction

Qualifier le taux de reconstruction d'un nuage signifie étudier la reconstruction de l'objet dans son intégralité, autrement dit vérifier s'il existe des zones sans que des points n'aient été reconstruits.

Le lidar apportant une information métrique, il est possible d'étudier la plus petite distance séparant un point du nuage d'étude d'un autre point du nuage de référence (nuage obtenu par lasergrammétrie).

MicMac peut traduire cette information de manière visuelle :

- En bleu : Un taux de reconstruction est élevé, des écarts entre les points faibles.
- En rouge : Un taux de reconstruction faible, des écarts entre les points élevé.
- Des couleurs intermédiaires

Un aperçu en image des résultats :

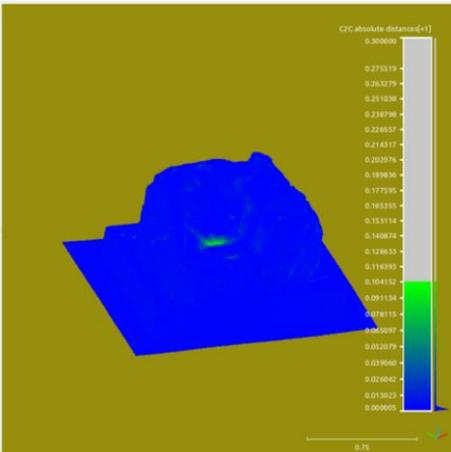


Figure 13 : Calcul des écarts avec toutes les images

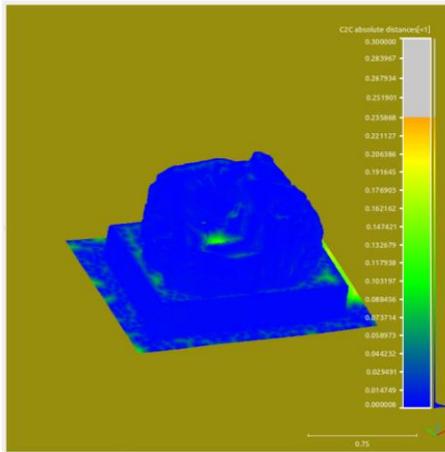


Figure 14 : Calcul des écarts pour une image sur 11

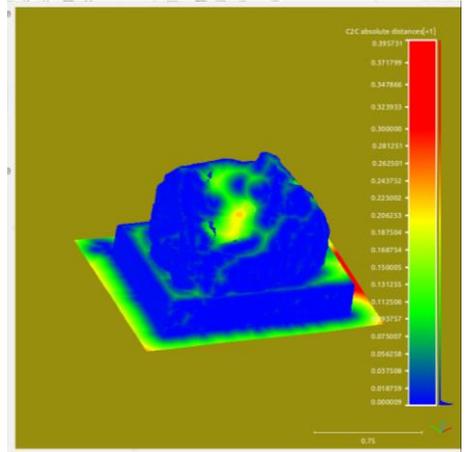
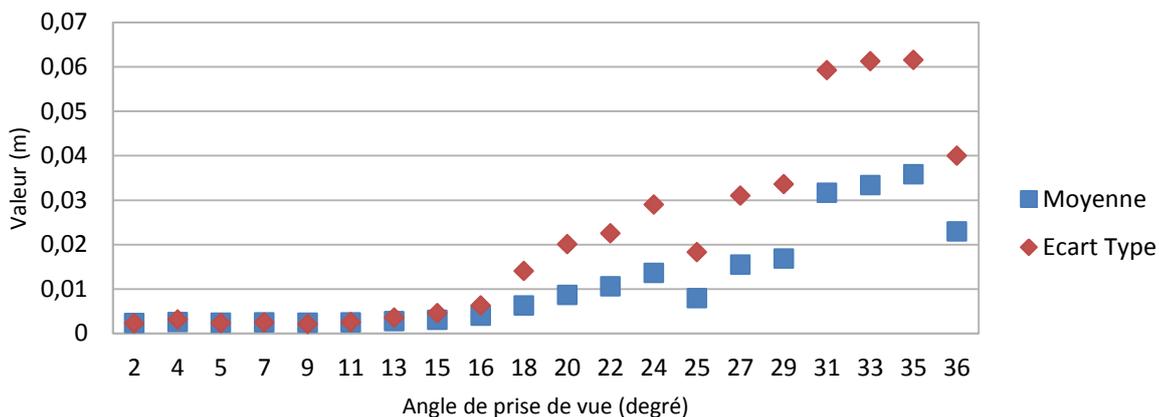


Figure 15 : Calcul des écarts pour une image sur 29

L'ensemble des tests statistiques effectués sur les nuages de points est rassemblé dans ce graphique :

Moyenne et Ecart Type des gaussiennes en fonction de l'angle entre les images



Observations :

- Les moyennes et les écarts-types des nuages d'étude par rapport au nuage de référence restent faibles jusqu'à un angle d'environ 11° entre deux clichés
- Passé cet angle, les valeurs en moyenne ainsi qu'en écarts-types augmentent fortement.

Conclusion : Plus l'angle entre deux prises de vues augmente, moins la reconstruction 3D restituée finement l'objet. Cela confirme les résultats du test précédent, un angle important diminue la détection de points homologues.

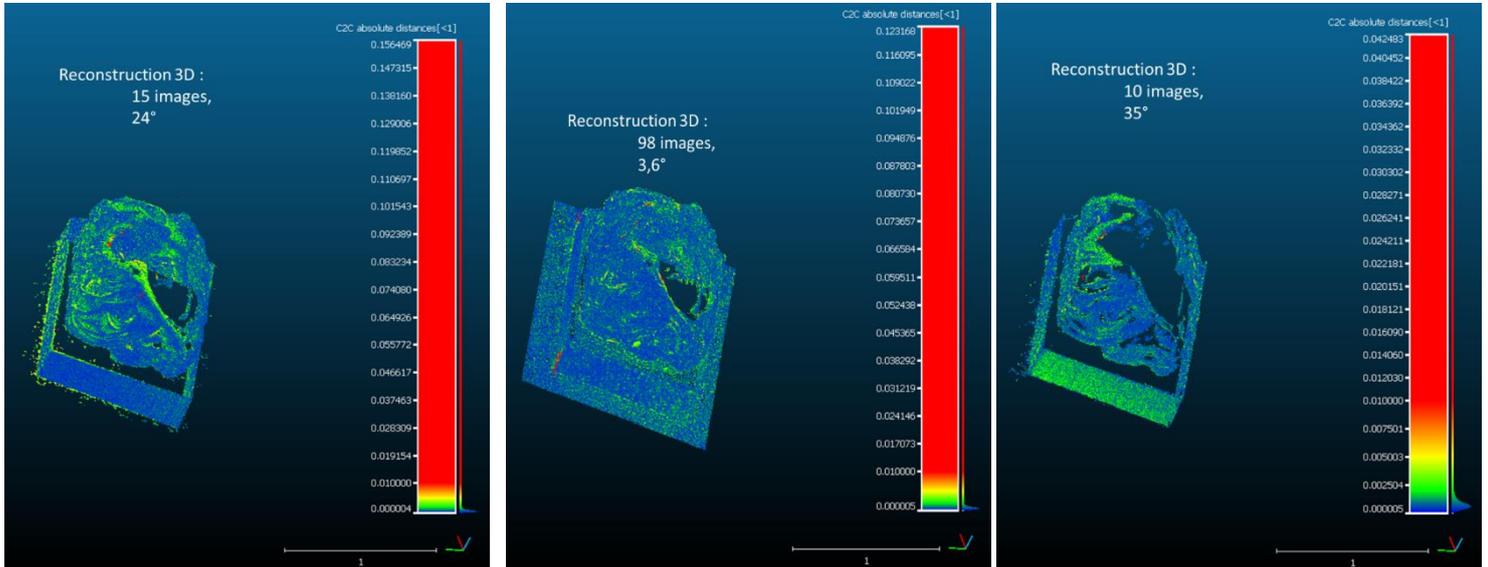
Il faut respecter un angle maximum de 11° entre deux clichés pour garantir un taux de reconstruction équivalent à celui du nuage de point obtenu par lasergrammétrie.

Il semblerait que la règle imposant un angle de 10° au maximum entre deux clichés soit validée.

c. Qualification de la précision des reconstructions :

Après avoir comparé la densité des nuages de points ainsi que leur taux de reconstruction, il faut qualifier la précision du nuage reconstruit. Pour cela, il faut comparer les distances entre un point du nuage de référence et le point du nuage d'étude qui lui est le plus proche. En effet, ces deux points sont censés représenter un même détail de l'objet. En d'autres termes, cela permet de savoir si ce qui a été reconstruit est précis et de pouvoir quantifier cette précision.

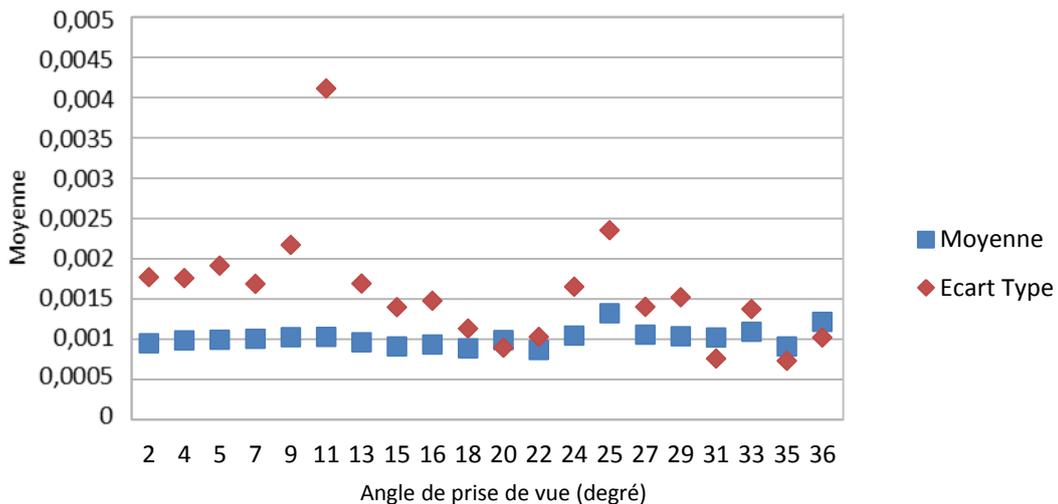
Un aperçu des résultats :



Observation : On constate que les reconstructions sont précises au millimètre (reconstructions majoritairement bleues), même avec un angle important.

Les paramètres des gaussiennes calculées ont été rassemblés dans le graphique suivant :

Moyenne et Ecart Type des gaussiennes en fonction de l'angle entre les images



Observations :

- En moyenne, chaque nuage de points des différents nuages d'étude semble accuser en moyenne un écart de 1mm au maximum avec les points du nuage lidar.
- Le nuage obtenu à partir de prises de vues séparées d'un angle de 11° sort toutefois du lot avec un écart-type plus important. Cette observation n'est pas en accord avec celle faite précédemment.

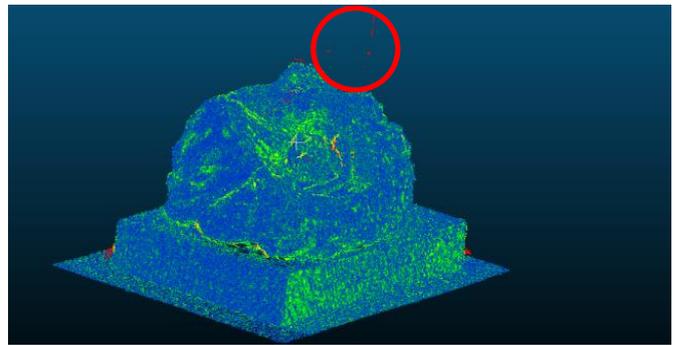
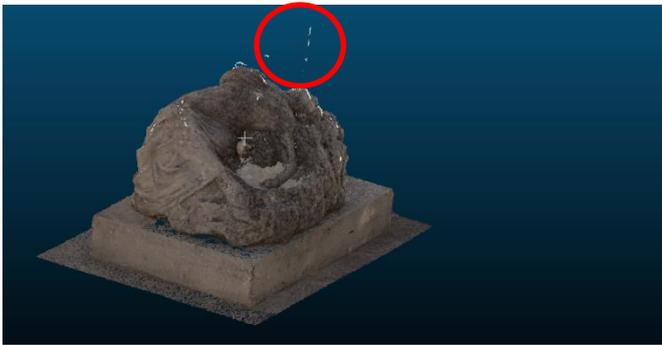
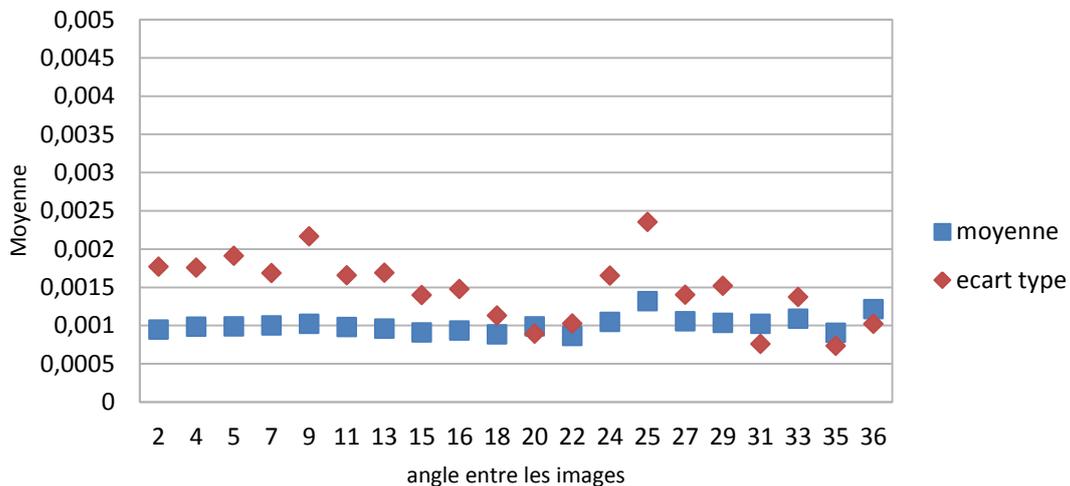


Figure 16 : Capture d'écrans du nuage de points obtenus à partir du jeu de clichés posant problème. (Angle de prise de vue fixé à 11°)

Observation : Encerclé en rouge, des points parasites dus à une mauvaise reconstruction 3D.

Après correction de ce nuage erroné, voici ci-dessous le même graphique que précédemment.

Moyenne et écart type des gaussiennes en fonction de l'angle entre les images



Observation :

- Les valeurs semblent plus cohérentes
- Pour un angle de prise de vue de 11°, l'imprécision moyenne est d'environ 1,5 mm par rapport au nuage Lidar.
- Pour un angle de prise de vue de 20°, l'imprécision moyenne semble minimale.

Enfin, il ressort des différents tests que :

- **Un angle maximal de 26° assure une densité importante du nuage reconstruit**
- **Un angle maximal de 11° assure un taux de recouvrement similaire au Lidar**
- **Quel que soit l'angle de prise de vue, les nuages reconstruits le sont précisément.**

Respecter un angle maximal de 10° est une règle que l'on peut valider.

9. Test : Influence de l'environnement

a. Problématique

Comme expliqué précédemment, le flou sur les images peut amener une difficulté pour le logiciel à repérer des points homologues sur les clichés et donc à assurer un taux de reconstruction important.

Ainsi, l'environnement (voitures, passants, feuilles...) en mouvement ne serait-il pas responsable de certaines imprécisions des nuages de points ?

Seulement, il convient également de rappeler que l'arrière-plan fixe des images peut permettre au logiciel de déterminer des points de liaisons supplémentaires et donc d'assurer une meilleure mise en place.

Le but de cette étude est de qualifier l'influence de l'environnement sur une reconstitution 3D.

b. Méthode de traitement

Deux jeux de clichés ont été étudiés :

- Un jeu « entière »
- Un jeu « recentrée ». Sur ce dernier, un masque a été placé en arrière-plan des images sans modifier leur résolution.

Voici ci-dessous un exemple de ces deux jeux :



A partir de ces deux jeux de données, le taux de reconstruction du nuage (Le nuage laser est pris en référence) ainsi que sa précision (Le nuage issu des clichés est pris en référence) sont analysés.

Les résultats des tests statistiques effectués se trouvent dans le tableau suivant :

	Laser Référence		Photo Référence		nb points
	moyenne	ecart type	moyenne	ecart type	
entiere	0,000952	0,001799	0,002647	0,003695	460230
recentree	0,000989	0,001882	0,002653	0,00364	460484
Difference	0,000037	0,000083	6E-06	5,5E-05	254

Observations :

- Les variations du taux de reconstruction sont faibles (de l'ordre du centième de millimètre)
- Les variations de la précision le sont également (de l'ordre du millièmètre de millimètre)
- On ne compte que 254 points reconstruits d'écart. (soit 0.05%)

En conclusion, les algorithmes implémentés dans MicMac sont performants dans la pondération des points de liaisons calculés, ce qui permet de pouvoir envisager un protocole 'grand public' pour la prise de vue, sans imposer de conditions trop utopiques réservées à des professionnels.

IV. La Photogrammétrie terrestre de précision

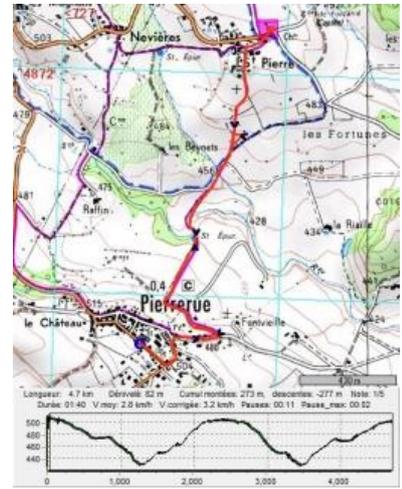
1. La Chapelle Saint Pierre : Un exemple de Photogrammétrie Terrestre de précision

La photogrammétrie au service de l'Architecture



Au cours du stage terrain à Forcalquier, un stage de « Photogrammétrie Architecturale » a été effectué, durant lequel la photogrammétrie terrestre de précision a été mise en application.

Le but était de fournir une reconstitution 3D ainsi que des orthoimages de la chapelle St Pierre, située dans le hameau de Saint Pierre, appartenant à la commune de Pierrerue (04300).



Cet endroit représente un intérêt pour la mise en application de tests photogrammétriques, ne serait-ce que pour ses petites façades, très texturées, ce qui favorise un grand nombre de points de liaison.

La photogrammétrie terrestre de précision est actuellement la meilleure solution pour des relevés de précision sur des façades complexes.

La technique consiste à exploiter des prises de vues stéréoscopiques équipées de points caractéristiques identifiables sur les photos et relevés en 3D sur le terrain, permettant le géoréférencement de la prise de vues.

2. Enchaînement des opérations techniques de la mission

a. Détermination du nombre de clichés utiles

En photogrammétrie terrestre, on se sert des images pour reconstruire le relief. Il faut donc que chaque point sur l'objet à reconstruire soit vu sur plusieurs images. Un recouvrement de 80% entre les clichés (un point est vu sur environ 5 images) est donc conseillé. Il faut alors tenter de déterminer le nombre de clichés nécessaires au levé des façades pour décider de l'emplacement des points d'appui.

b. Mise en place de point d'appui et détermination de points de détails

Rappels

Un point d'appui est un point dont on connaît les coordonnées terrain ainsi que les coordonnées images.

Un point naturel est un point d'appui qui repose sur un détail naturel de l'objet (et non d'une ciblette).



Les points d'appui

Ils sont matérialisés par de petites ciblettes, faciles à viser précisément avec un tachéomètre.

Les points naturels

Ici, les points naturels (les plus précis possibles) permettent de remplacer les ciblettes dans les zones inaccessibles de la chapelle (toiture, hauteur...).



3. Etat des lieux : Pierrerue

a. Les facteurs influençant la position de la caméra

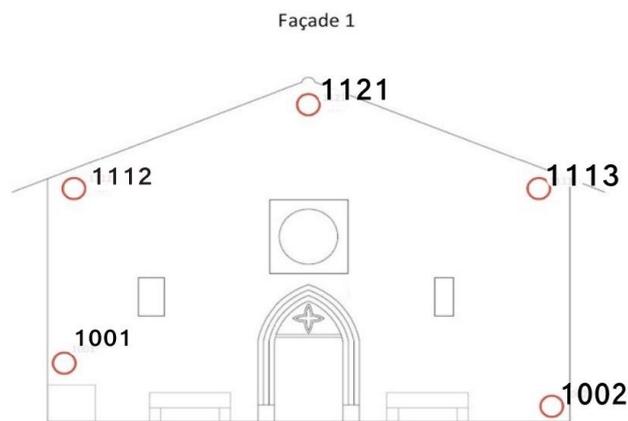
Trois jeux de photos de la chapelle étaient à disposition. Le 1er jeu était trop dépourvu de recouvrement pour pouvoir être exploité. Le 2^{ème} jeu, lui, était convenable, mais les coordonnées des points d'appui n'avaient pas été conservées. De plus, par manque de temps, il se serait avéré difficile, voire dangereux, de remettre en place une polygonation complète de la chapelle.

Il a donc fallu utiliser un 3^{ème} jeu de clichés, réalisés il y a quelques années, disposant de 5 points d'appui.

Si on travaille généralement sur les points de contrôle, qui qualifient à la fois l'orientation et la position des sommets de prise de vue, pour qualifier la mise en place des clichés. On a ici fait le choix d'étudier la variation de position des sommets de prise de vues. En effet, le nombre minimum de points d'appui nécessaire étant de 3, il aurait été trop insuffisante de faire l'étude sur seulement 3 points d'appui et 2 points de contrôle.

Trois grands tests ont été effectués :

- **Test 1** : L'ensemble des 5 points d'appui ;
- **Test 2** : 3 points d'appui, répartis sur toute la façade étudiée (1001, 1002, 1113) ;
- **Test 3** : 3 points d'appui, répartis d'un seul côté de la façade (1001, 1112, 1121).



Le but de l'expérience est de compenser par ces différents tests la position de la caméra, et par la suite d'étudier l'impact du nombre et de la répartition des points d'appui, ainsi que de la méthode de calcul sur la mise au point : basculement simple ou suivi d'une compensation photogrammétrique.

b. Méthode de calcul

Tout d'abord, chaque point d'appui doit être pointé sur 2 photos. On effectue ensuite un basculement sur les 6 images étudiées : cette opération servira par la suite de « solution initiale » au reste des calculs.

Une fois cette première étape terminée, on sélectionne tous les points d'appui sur toutes les images, puis on applique un basculement simple sur le tout. On peut ensuite effectuer, ou pas, une compensation photogrammétrique.

Ainsi, pour chaque image du jeu, on détermine les coordonnées de la caméra de 2 façons différentes :

- en effectuant un basculement simple : l'ensemble des images est basculé dans un certain repère, les positions des images les unes par rapport aux autres étant inchangées;
- en effectuant une compensation photogrammétrique ou phototriangulation : compensation par moindres carrés basée sur les points de liaison et d'appui, pour ajuster au mieux la position de la caméra, effectuée entre les clichés.

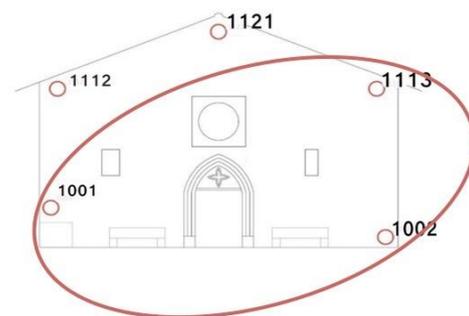
Une fois le jeu complet traité, on calcule la moyenne des écarts de ces coordonnées.

c. Résultats

Ecart Phototriangulation-Basculement Simple				
	dX	dY	dZ	Distance
1 ^{er} test	0,000209885	0,000372277	-5,67776E-06	0,000427404
2 ^{ème} test	0,000105393	0,000254961	1,18807E-05	0,000276141
3 ^{ème} test	0,00035315	-0,00035148	-0,000441666	0,000665824

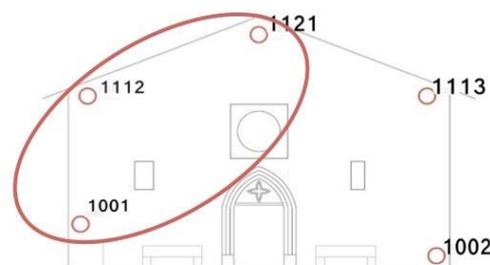
Dans un même test, les coordonnées issues de la compensation photogrammétrique et les coordonnées issues d'un basculement simple diffèrent légèrement, d'un écart moyen de l'ordre du dixième de millimètre : la phototriangulation compense donc bien le basculement, mais reste négligeable.

	Ecart 1 ^{er} – 2 ^{ème} test			
	dX	dY	dZ	Distance
Phototriangulation	- 0,00096094 5	0,00082139 1	-0,00097317	0,00159535 6
Basculement Simple	- 0,00106543 7	0,00070407 5	- 0,00095561 2	0,00159501 5



Lorsqu'on passe de 5 à 3 points d'appui, répartis sur toute la façade, l'écart varie de l'ordre du dixième de millimètre au millimètre. Le jeu à 5 points et le jeu à 3 points sont trop proches pour qu'une véritable conséquence de la réduction du nombre de points d'appui puisse être observée.

	Ecart 1 ^{er} – 3 ^{ème} test			
	dX	dY	dZ	Distance
Phototriangulation	0,00380950 7	- 0,00061769 4	- 0,00428345 3	0,00576557 5
Basculement Simple	0,00395277 2	- 0,00134145 1	- 0,00471944 1	0,00630055 7



Lorsqu'on passe de 5 à 3 points d'appui, répartis d'un seul côté de la façade, en revanche, les écarts sont plus prononcés, de l'ordre du millimètre. Ainsi, on peut supposer que la répartition des points d'appui sur la façade a une certaine influence, plus importante que celle de la phototriangulation.

Finalement, on tire les conclusions suivantes :

- > Si la compensation photogrammétrique influence bien les coordonnées de la position de la caméra, les variations apportées sont négligeables.
- > La répartition des points sur la façade influence la position de la caméra de manière plus significative.

L'influence du nombre de points d'appui ne peut être vérifiée ou démentie ici : les cas à 5 points et à 3 points sont trop proches pour qu'une conclusion puisse être tirée. Il faudra étudier ce cas sur le second chantier de précision, effectué à l'école, en utilisant un nombre de points d'appui plus important (au moins 15 points).

4. Chantier de précision au centre IGN de Forcalquier

a. Présentation du polygone d'étalonnage

Le centre IGN de Forcalquier dispose d'un polygone d'étalonnage, composé de 80 points d'appui environ, connus en coordonnées terrain (contre 5 pour Pierrerue).

Ainsi, dans le cadre d'une étude plus approfondie de l'influence du nombre de points d'appui et de points de liaison, ce site a été choisi pour poursuivre les tests. Ce site a été choisi pour 3 raisons par rapport à Pierrerue : il présente plus de points de liaison, une longueur plus importante et une texture plus faible, il y aura donc plus de points utilisables.



Figure 18 : Photos des points d'appui utilisés sur le centre IGN

b. Gestion des points de liaison et de la compensation

- Mise en œuvre de l'acquisition

Pour que les données soient exploitables, il fallait que les photos prises du polygone possèdent un bon recouvrement. Une séance de prises de vues du site a donc été effectuée dans ce but, à l'aide d'un canon 70D.

A partir de ces images, différents tests ont été réalisés :

- Pour un même nombre de points d'appui, vérifier l'apport des points de liaison ;
- Pour un nombre de points d'appui et de points de liaison fixé, comparer l'apport de la compensation par moindre carré de MicMac (commande Campari) par rapport à un simple basculement ;
- Montrer l'importance des points d'appui et de leur répartition en analysant le phénomène de dérive.

Tout d'abord, les tests sont réalisés avec les fichiers du basculement et de compensation calculés par MicMac avec l'ensemble des points d'appui, avec des points de liaison calculés sur des images de résolution 1000 et 2500 pixels (Plus la résolution est grande, plus MicMac trouve de points de liaison). La compensation par moindre carré avec la résolution de 2500 pixels est choisie comme référence.

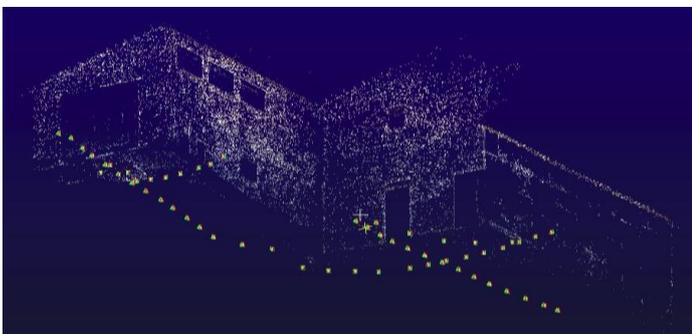


Figure 19 : Mise en place résolution 1000

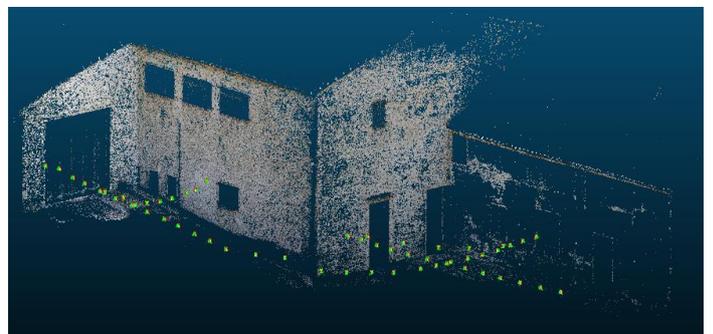


Figure 20 : Mise en place résolution 2500

- Traitement des données

Lors de la mise en place, MicMac place les images dans un repère fictif. Afin de comparer les résultats, il est nécessaire de basculer du repère fictif à un repère terrain, c'est-à-dire qu'il fixe les coordonnées des points d'appui. De plus, MicMac dispose d'un outil de compensation par moindres carrés (phototriangulation), qui permet d'ajuster au mieux ce basculement.

Pour chacun des tests, les coordonnées des sommets de prise de vue issues du basculement (« Bascule») et de la compensation (« Phototriangulation »), à des résolutions différentes (1000 et 2500), ont été récupérées. Nous avons ensuite calculé la distance les séparant.

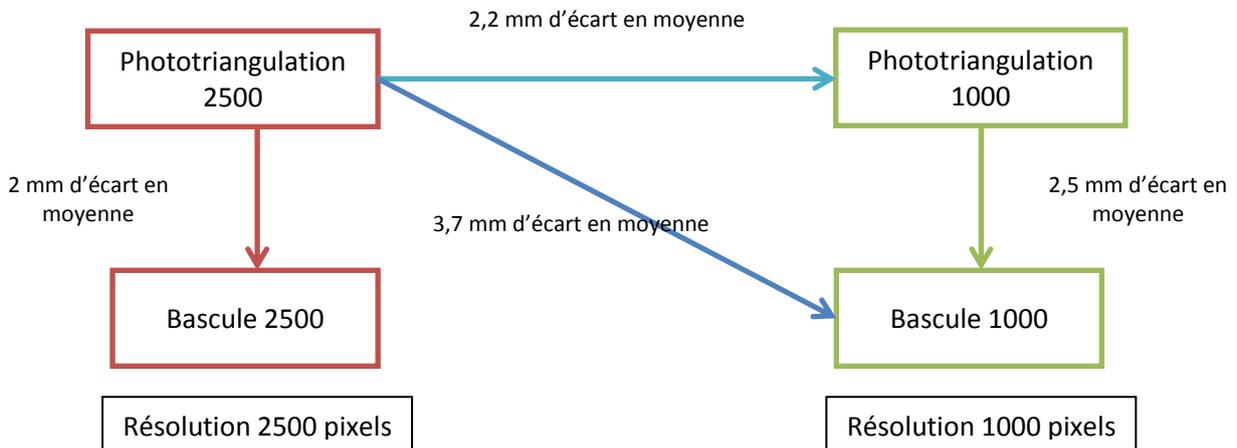


Figure 21 : Représentation des écarts entre les différents tests

- *Impact des points de liaison*

Pour évaluer l'impact des points de liaison, la compensation photogrammétrique a été comparée au calcul des points de liaison avec la référence (« Phototriangulation 2500 »). L'écart de 2,2 mm montre que le nombre de points de liaisons a une influence dans les calculs des coordonnées des sommets des caméras et par suite la qualité du nuage de points produit.

« Bascule 1000 » a aussi été comparé à la référence et un écart de 3,7 mm a été obtenu : encore une fois l'apport de points de liaison et la phototriangulation permet un meilleur basculement.

- *Impact de la compensation*

Pour comparer l'apport de la compensation, « Bascule 2500 » a été comparé avec la référence « Phototriangulation 2500 ». La distance moyenne de 2mm montre la répercussion de la compensation sur la détermination de la position des caméras.

Aussi, la comparaison de « Bascule 1000 » à « Phototriangulation 1000 » montre l'influence de la compensation. L'écart moyen est ici de 2,5mm.

c. Le phénomène de dérive

Ce test repose sur le même principe que précédemment, mais avec seulement quelques points d'appui. Cette fois-ci, l'objectif est d'étudier la dérive : pour cela, on compare les écarts de position de la caméra entre les tests à quelques points d'appui et les tests avec tous les points.



Figure 21 : Photo panoramique du centre IGN

- *Impact des points d'appui sur une extrémité*

Tout d'abord, des points d'appui ont été fixés à une extrémité seulement du bâtiment étudié (façade 1). Ainsi, seuls les points de liaisons vont servir à basculer les façades 2,3 et 4. Est-ce que les points de liaisons suffiront à bien positionner la façade la plus « flottante » (façade 4) ?

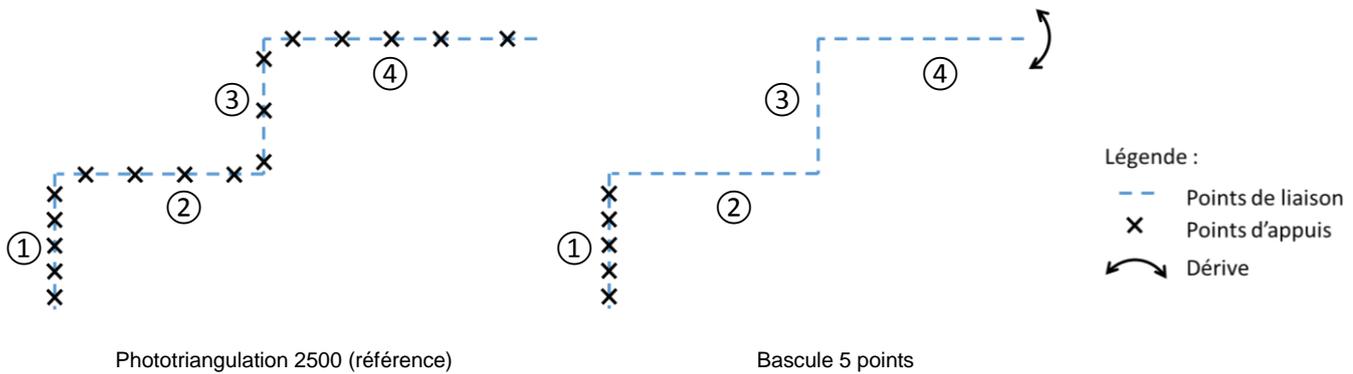


Figure 22 : Schéma montrant le protocole

Le premier test consiste à comparer « Bascule 1000 » avec des points d'appui sur la façade 1 à la référence. En reportant sur un graphique (voir Figure 24) les valeurs de la distance entre la position de la caméra pour « Bascule 1000 » et la référence (courbe bleue), on observe un phénomène de dérive en fonction de l'éloignement aux points d'appui.

En effet, on remarque quatre pentes différentes correspondant aux quatre façades du bâtiment. La concavité du changement de pente est due à la récupération ou non d'information au niveau des angles, selon qu'ils sont entrants ou sortants. Les angles entrants ont une configuration qui permet la récupération des points de liaison calculés sur les deux façades. En revanche, pour les angles sortants, la prise de vue est trop rasante avec les façades, ce qui restreint le nombre de points de liaison pris en compte. Par conséquent, les angles entrants diminuent le phénomène de dérive. Les angles sortants diminuent aussi l'ampleur de la dérive mais dans une moindre mesure. Les améliorations sont essentiellement dues au fait que l'on a pris des photos spécifiques dans les angles, rigidifiant la mise en place.

Le second test consiste à augmenter le nombre de points de liaisons et à voir leur conséquence sur le phénomène de dérive constaté dans le test précédent. On observe une amplitude plus faible par rapport aux distances calculées précédemment, c'est-à-dire que plus il y a de points de liaison, plus le phénomène de dérive est réduit. En outre, les points de liaisons améliorent significativement le basculement (autour de deux centimètres lors de ce test).

- *Impact des points d'appui sur aux deux extrémités*

Puis des points d'appui ont été ajoutés sur la façade 4 pour montrer l'influence du nombre de points d'appui et leur répartition.

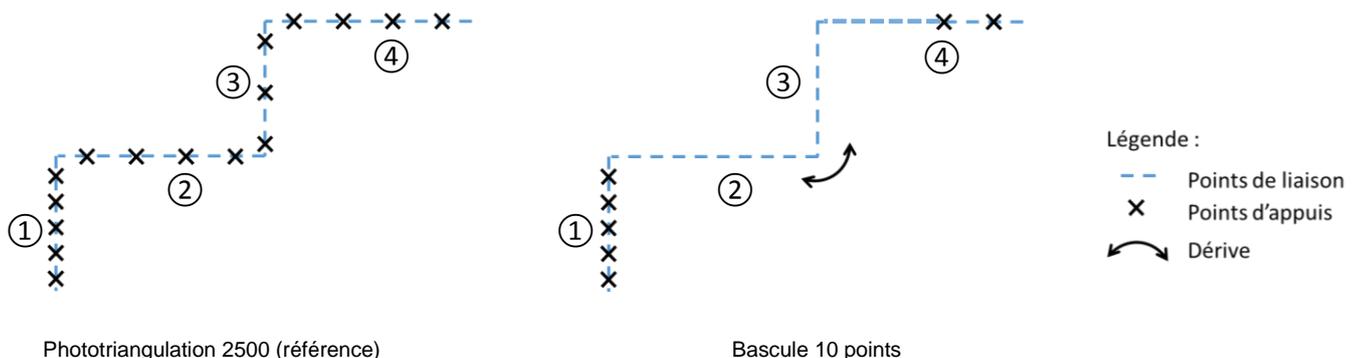


Figure 23 : Schéma montrant le protocole

Lors de ce test, « Bascule 1000 » et « Bascule 2500 » (10 points d'appui) ont été comparés avec la référence. Dans tous les cas, le phénomène de dérive est amoindri par rapport aux cas précédents, où seulement 5 points d'appui à une extrémité étaient fixés. Cela montre l'apport des points d'appui.

L'analyse de la courbe des distances de « Bascule 1000 » (courbe violette) montre que les angles participent encore au phénomène de dérive car il existe trop peu de points de liaison, bien que les deux extrémités soient fixées. En effet, l'allure de la courbe suit la profondeur du bâtiment, comme pour le test avec les points d'appui fixés sur une seule façade. On constate cependant que la dérive se propage jusqu'au milieu de la façade 4, lieu où les points d'appui fixés sur cette façade apparaissent dans les images.

Concernant la courbe des distances de « Bascule 2500 » (courbe verte), le phénomène de dérive est « lissé » en raison du nombre important de points de liaison. Ils sont effectivement mieux répartis sur l'ensemble des façades. Par conséquent, les angles ne sont plus prépondérants dans les calculs.

Bilan des tests :

Phénomène de dérive

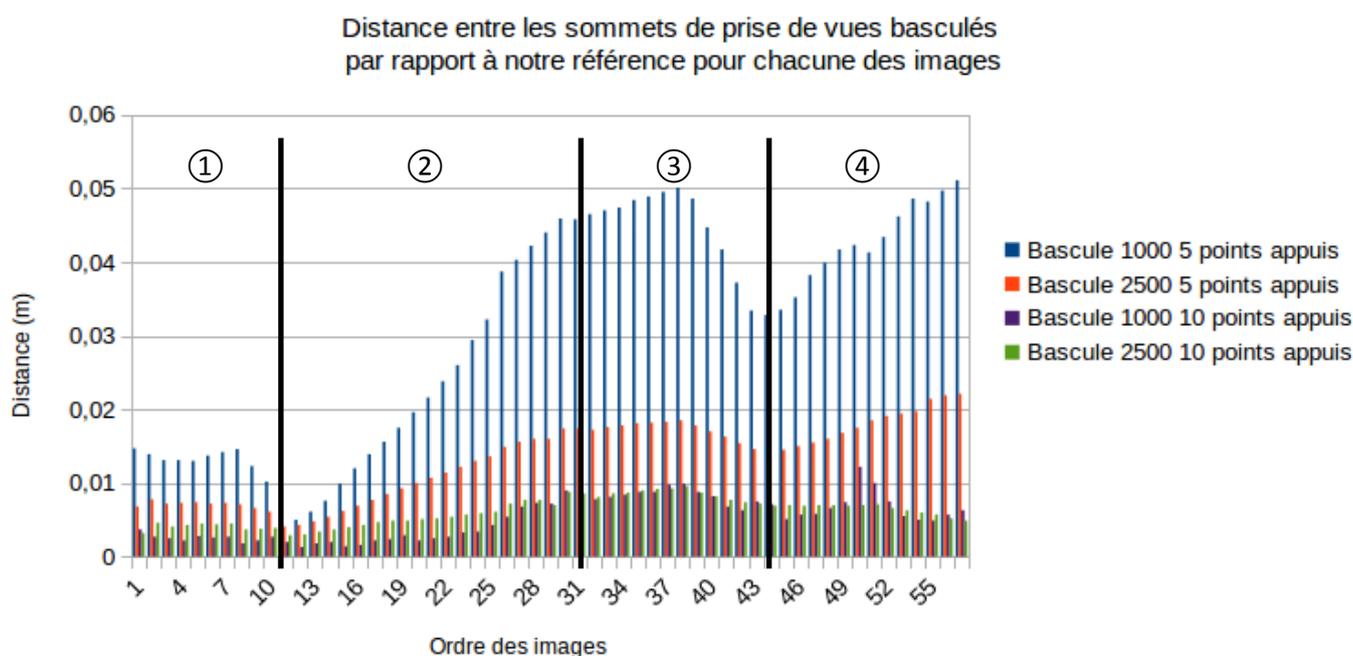


Figure 24 : Phénomène de dérive

L'importance des points d'appui a été démontrée lors de l'ensemble des tests effectués sur le polygone d'étalonnage. Plus il y a de points de liaison, plus l'influence de la compensation est importante, plus les coordonnées des sommets de prise de vues sont compensées, et donc proches des coordonnées réelles comme le montre plus clairement la figure 25. Le phénomène de dérive a également été mis en évidence. Résultat inattendu, les angles entrants réduisent ce phénomène. Dans la procédure, la position des caméras est contrôlée sans se soucier de leur orientation. L'utilisation de points de contrôle aurait permis de vérifier la position et l'orientation des caméras.

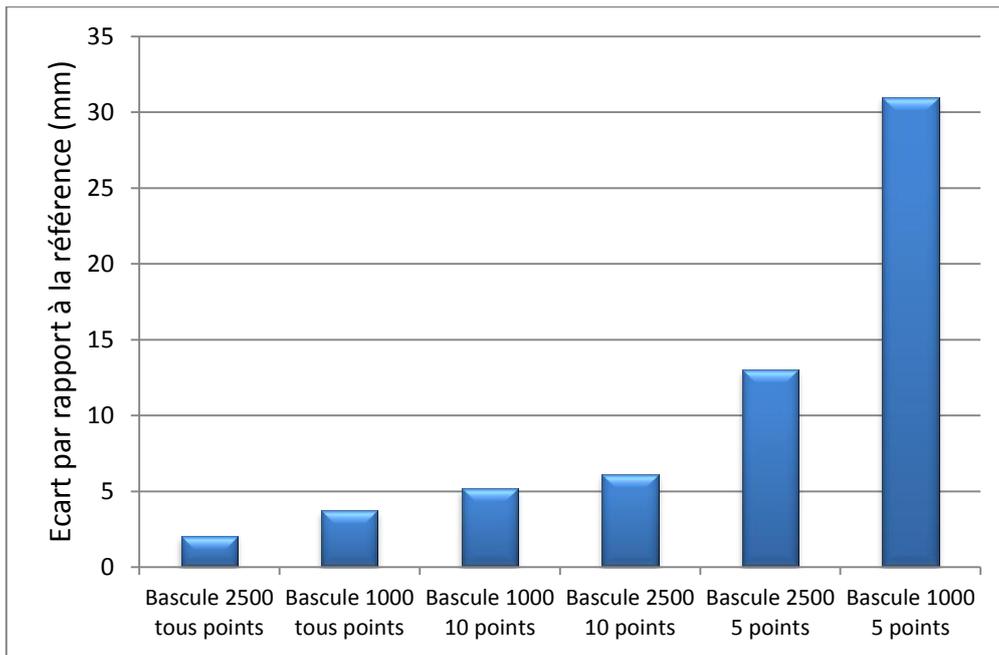


Figure 25 : Résumé des tests montrant l'influence des points d'appui et des points de liaison

V. Conclusion Générale :

Le projet proposé associait deux chantiers qui ne semblaient pas avoir les mêmes finalités : le participatif et la précision. D'un côté, l'objectif était de reconstruire un objet en 3 dimensions en étant le plus souple possible au niveau du protocole d'acquisition, afin de vulgariser la photogrammétrie pour le grand public, qui n'a pas de connaissance préalable sur le fonctionnement de la reconstruction 3D. D'un autre côté, l'objectif était de contrôler le protocole d'acquisition réservé au chantier de précision.

Mener ces deux chantiers en deux semaines a été un challenge et une bonne expérience. Peu d'informations pour ce genre d'applications existent. En effet, MicMac est plus utilisé au sein de l'IGN pour la génération de Modèle Numérique de Terrain que pour la reconstruction d'objets du quotidien. Il était donc nécessaire d'être méthodique, organisé et il a fallu gérer l'équipe de travail pour ne pas s'égarer. Il s'est avéré très intéressant d'effectuer un travail de recherche et d'arriver à des résultats prometteurs.

Bien évidemment, et toute la complexité du projet résidait là, les deux chantiers se rejoignent sur un point : la précision nécessaire pour reconstruire un objet en participatif et la précision suffisante à un chantier de précision. Il y a beaucoup à explorer dans cette direction, afin d'exploiter toute la synergie de ces deux types de chantiers ; d'autant plus que la puissance des machines actuelles et futures, l'amélioration des capteurs, et notamment celle des smartphones, et l'accessibilité des logiciels libres de reconstruction 3D (MicMac) et de traitement (CloudCompare) tendent à démocratiser la photogrammétrie et ses enjeux au quotidien, et permettent d'accumuler de nouvelles données pour des chantiers de précision. Il faudra donc automatiser le processus et développer une interface intuitive et multiplateforme pour le grand public. Ces améliorations sont au cœur des problématiques du monde d'aujourd'hui et de demain, car nous ne sommes pas encore conscients du potentiel de la photogrammétrie, que ce soit pour la recherche, pour l'industrie ou pour la conservation historique.