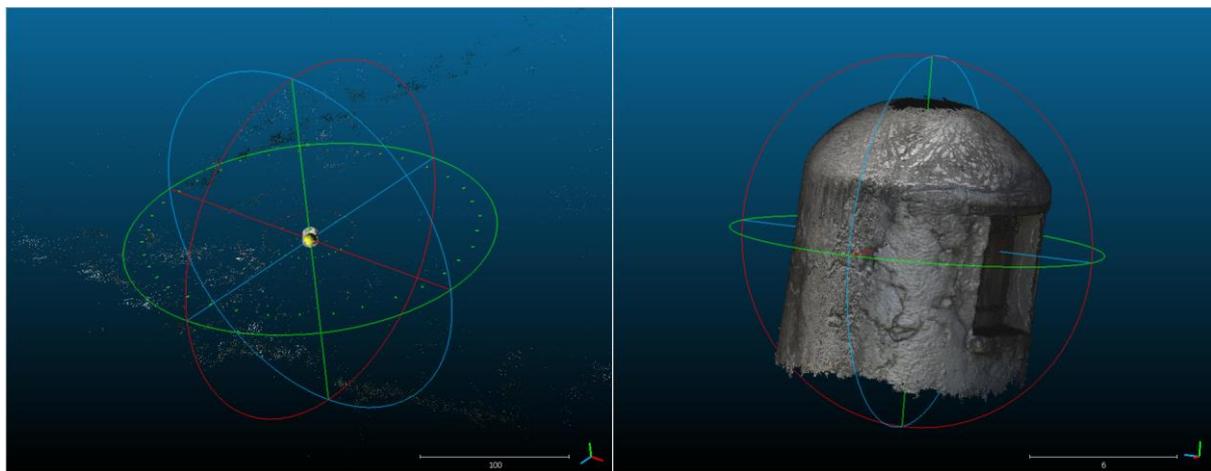


Rapport de projet

Photogrammétrie terrestre de près et de loin (DPDL)



Projet réalisé par Louise BERGER, Pierre BOYMOND, Louis HALTZ et Maud DESJARDINS
Encadré par Jean-François HANGOUËT

Photogrammétrie terrestre DPDL

Table des matières

Introduction.....	2
I. Mise en place des modèles photogrammétriques.....	3
1. Montagne de Lure	3
2. Les Mourres.....	5
3. Prieuré de Salagon.....	9
4. Les Mées.....	14
5. Pierrerie.....	17
a. Balayage	18
b. Prises de vue de face	21
II. Protocoles photogrammétriques	24
1. Reconstruction successive.....	24
2. Lien entre angle d'intersection et pourcentage de points de liaisons utilisés.....	26
3. Balayage	30
III. Influence de la réfraction atmosphérique.....	31
1. Protocole photogrammétrique avec nuage de points	31
2. Protocole photogrammétrique avec une image	32
Conclusion	36
Annexe.....	37
Logiciel de renommage	37
Commandes MicMac.....	37

Introduction

Ce projet de photogrammétrie terrestre de près et de loin (DPDL) a pour but de comparer les acquisitions photogrammétriques en fonction des distances de prise de vue.

Le premier objectif est de concevoir des protocoles d'acquisitions photogrammétriques selon la focale de l'appareil photo et la distance, qui vont de quelques mètres à plusieurs kilomètres suivant le chantier (c'est-à-dire selon sa configuration topographique et les spécifications fixées par le commanditaire). Le traitement des prises de vues effectué sur les logiciels *MicMac* et *CloudCompare* permet d'analyser chaque modèle et de fournir des éléments de comparaison. Plusieurs expériences auront été établies afin d'en déduire des recommandations sur la manière de mener des chantiers photogrammétriques.

Le second objectif est d'observer le phénomène de réfraction atmosphérique sur la trajectoire des rayons lumineux. D'après notre analyse, déceler ce dernier nécessite la mise en place de protocoles d'observation spécifiques. Celui que nous préconisons comporte différentes étapes : la recherche des configurations topographiques favorables, la maîtrise fine de la position et de l'orientation de l'appareil photo, la recherche de quasi-alignements entre objets relativement proches et objets relativement lointains. Ainsi, par différence entre les positions réelles et fictives sur photo de l'objet lointain, il sera possible d'en déduire l'effet de la réfraction atmosphérique sur la position de l'objet lointain dans la photographie.

I. Mise en place des modèles photogrammétriques

Dans le but de comparer les acquisitions photogrammétriques en fonction des distances de prises de vue, nous avons défini un protocole initial d'acquisitions photogrammétriques de près (DP) et de loin (DL), qui a été complété et amélioré au fur et à mesure des traitements effectués sur les logiciels *MicMac* et *CloudCompare*, ainsi que des expérimentations sur le terrain. Petit à petit, en comparant les différents modèles de prises de vue, nous avons pu en déduire des recommandations sur la manière de mener des chantiers photogrammétriques pour lesquels les spécifications laissent certaines latitudes (en termes de résolution et de précision).

Avant toutes choses, nous avons déterminé, sur la base des cours théoriques de photogrammétrie, qu'il était important que nos protocoles prennent en compte :

- La calibration de l'appareil photo utilisé pour les prises de vue : pour toutes les photos d'une prise de vue, il faut que les réglages (focale et mise au point, pour la précision géométrique ; ISO, ouverture et temps de pose, pour la régularité des couleurs) restent les mêmes, avec l'objet se trouvant à l'infini (pour les prises de vue lointaines).
- La qualité des images faites avec un zoom ou un téléobjectif : la quantité d'informations contenues dans les pixels ainsi que la qualité (bruit, distorsion radiale).
- Les conditions météorologiques : la luminosité et les éventuelles ondulations de l'atmosphère liées à la chaleur qui peuvent jouer sur la qualité des photos et la radiométrie.

Cette partie explique les différentes applications que nous avons mises en place sur le terrain, les résultats obtenus, les analyses que nous avons opérées et les conclusions que nous avons tirées pour en déduire des protocoles photogrammétriques fonctionnels.

1. Montagne de Lure

L'idée était de faire un test initial en altitude en cherchant à mettre en évidence la réfraction entre les prises de vue DL et DP (*cf. Partie III*) tout en ayant un premier aperçu des reconstructions en nuage de points et en 3D d'un cairn en fonction de la distance.

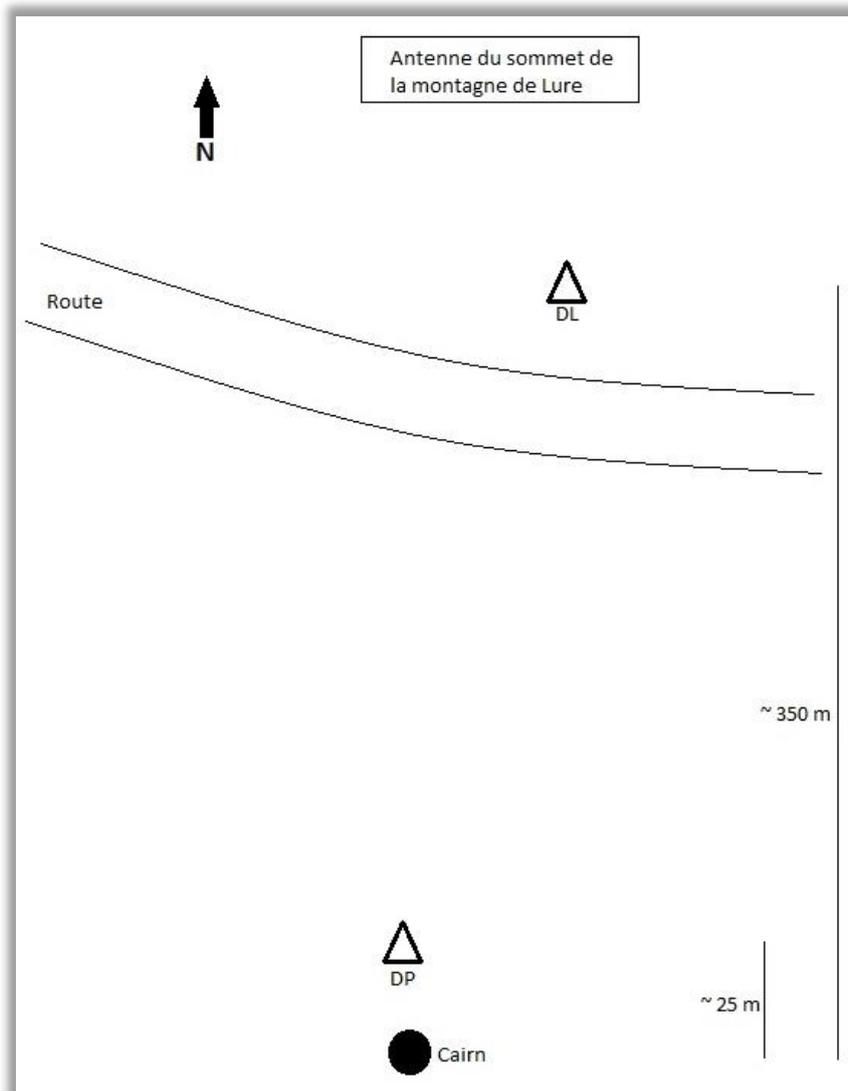
Pour nos prises de vue, nous avons procédé par acquisitions de face et prenant le cairn au centre de la photo. Nous n'avons pas déterminé de nombre de clichés adéquats pour le traitement des images, seulement que nous voulions un recouvrement de 100% entre chaque photo, tout en se décalant de 10° entre les sommets de prise de vue (conformément aux recommandations exprimées lors du stage de photogrammétrie architecturale).

Date : 19/07/2017

Conditions météorologiques : Journée très chaude et ensoleillée avec des nuages par moment et du vent en altitude (~ 1750m). Les prises de vues ont été effectuées respectivement en matinée (T=18°C) pour celle de loin et en début d'après-midi (T=24°C) pour celle de près.

Réglages de l'appareil photo : 2 prises de vue à environ 25m de près et 350m de loin

- Canon Mark III avec téléobjectif
- Focale : 200mm
- ISO : 100
- Ouverture : 10
- Temps de pose : 1/15s



Disposition du chantier

Le traitement des prises de vue n'a pas fonctionné car les photos étaient trop lumineuses et donc les réglages n'étaient pas adaptés : les histogrammes étaient saturés dans les blancs, entre le ciel et le sol crayeux. De plus, les clichés étaient trop peu nombreux pour effectuer une reconstruction correcte même si la radiométrie avait été exploitable.

Au niveau de la forme des photos, nous les avons pris au format paysage pour faciliter la mise en évidence de la réfraction mais dans le cas de la photogrammétrie, il est mieux d'adapter l'orientation à celle de l'objet, soit un format portrait pour le cairn ou un format paysage pour une façade, ainsi l'image peut couvrir en majorité l'objet. De même, l'image sera moins saturée par le ciel, ce qui donnera un meilleur histogramme.

Pour la suite, nous avons décidé de matérialiser les sommets de prise de vue par des piquets et de prendre plusieurs prises de vue avec des focales différentes, de près et de loin, afin de comparer les reconstructions 3D en fonction de la distance et de la focale utilisée. Ceci s'est fait sur le site des Mourres et sur celui de Salagon.

2. Les Mourres

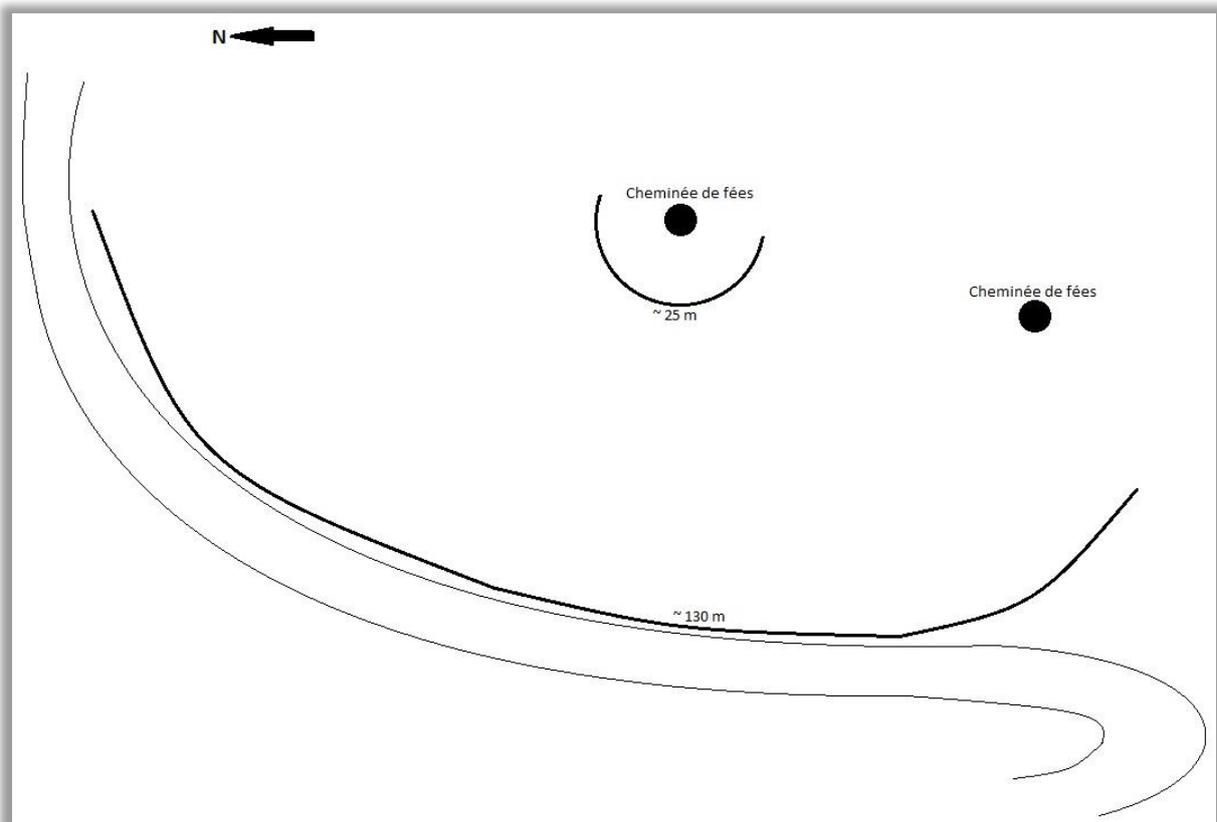
L'objectif de cette acquisition était de réaliser des prises de vue exploitables en faisant varier la focale de l'appareil photo. Nous avons commencé par poser, en cercle, 19 piquets tous les 5m, à 25m de la cheminée de fées face à l'Est, pour la prise de vue de près. Nous avons ensuite effectué les prises de vue aux focales 24, 100 et 200 millimètres. Puis, nous avons répété l'opération avec 12 piquets écartés de 30m à environ 130m.

Date : 21/07/2017

Conditions météorologiques : Journée très chaude et grand soleil. Pas de vent, ni de nuages. Entre le début et la fin des acquisitions photos, la température a augmenté de $T=19^{\circ}\text{C}$ à $T=26^{\circ}\text{C}$. Alt = 663m

Réglages de l'appareil photo : 6 prises de vue à environ 25m de près et 130m de loin

- Canon Mark III avec et sans téléobjectif
- Focale : 24mm, 100mm, 200mm
- ISO : 100
- Ouverture : 10
- Temps de pose : 1/60s



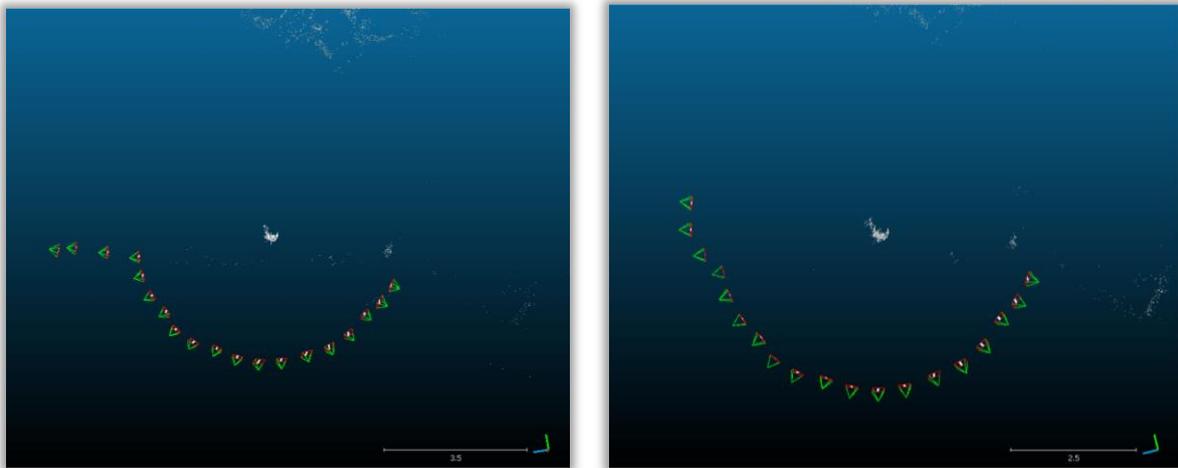
Disposition du chantier

Pour mieux associer les photos aux prises de vue, nous avons commencé par renommer toutes les images à l'aide du logiciel *QuickFileRename* en ajoutant des suffixes appropriés par rapport aux distances et aux focales utilisées. Les reconstructions 3D ont été essayées, dans un premier

temps, de façon directe : après avoir créé les points de liaison (« *Tapioca All* ») pour les prises de vue de près, nous avons effectué l'orientation relative (« *Tapas RadialStd* ») et sa visualisation (« *AperiCloud* »). De même avec les prises de vue de loin.

Remarque : Les commandes Micmac utilisées et leur signification se trouvent en Annexe.

Pour les prises de vue de près, il a fallu calibrer les prises de vue en focale 100mm et 200mm avec celle de 24mm sinon l'orientation relative ne fonctionnait pas. De plus, l'orientation relative au niveau des 4 images les plus au Nord de la cheminée de fées ne fonctionnait pas. En effet, celles-ci ne se plaçaient pas correctement dans l'arc de cercle défini par les piquets mais décrivaient une ligne plus en arrière, comme si ces photos avaient été prises à plus de 25m de la cheminée, ce qui n'était pas le cas. Pour contourner ce problème, nous avons relancé l'orientation relative sans ces images, puis nous l'avons recalculé à partir de l'orientation partielle faite auparavant en les réintégrant dans le calcul.

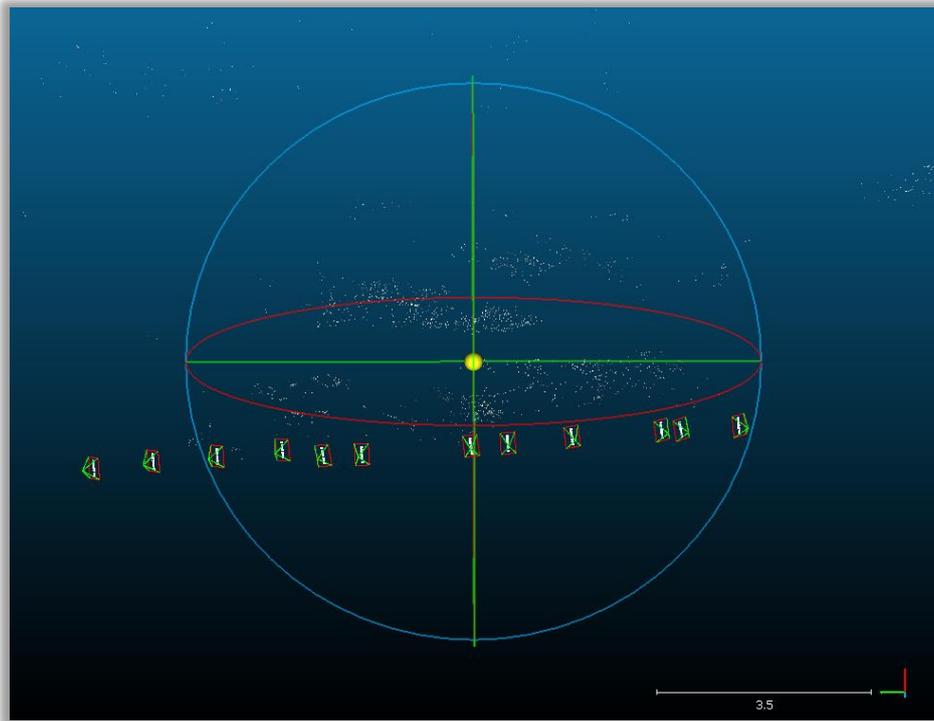


Avant et après la réorientation relative

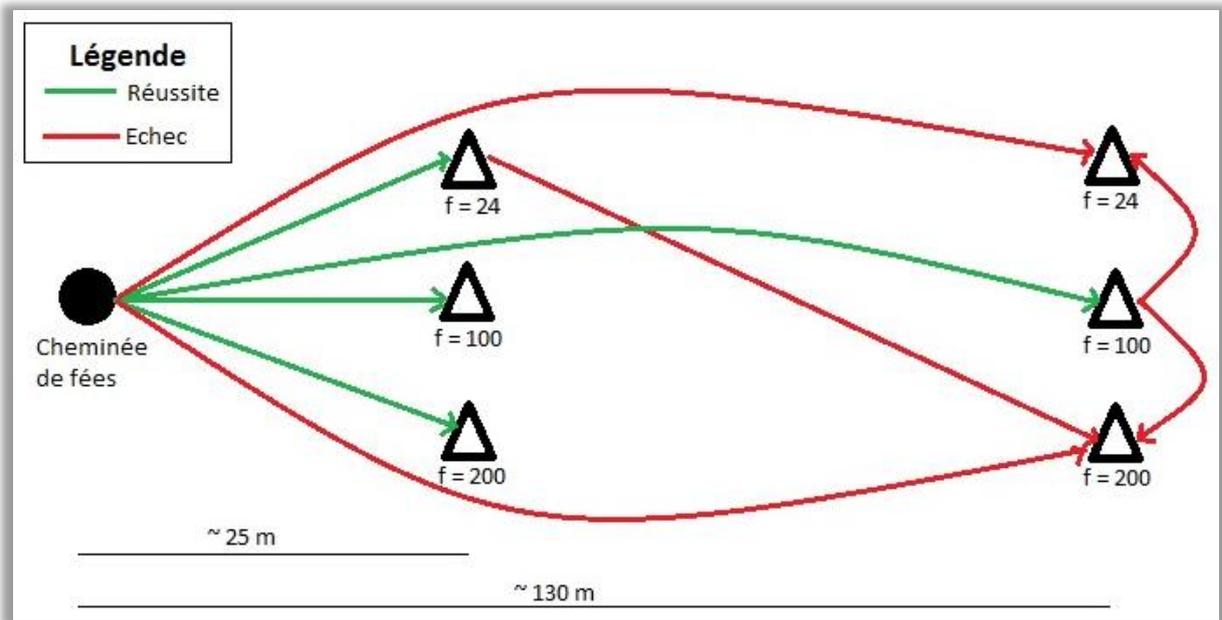
Ceci était en réalité dû à la variation de radiométrie entre les images car les paramètres de l'appareil photo étaient toujours les mêmes au cours de l'acquisition bien que le Soleil ait fortement avancé dans le ciel entre 9h et 11h du matin et donc la face Nord de la cheminée de fées se trouvaient dans l'ombre du Soleil.

Pour les prises de vue de loin, la reconstruction 3D directe n'a pas abouti, excepté pour la focale à 100mm. Plus précisément, l'orientation relative de la prise de vue à 24mm fonctionnait correctement mais lors de la visualisation, on pouvait constater que le positionnement des photos n'était pas cohérent avec la réalité terrain. Quant à l'orientation relative de la prise de vue à 200mm, elle ne fonctionnait pas du tout. Nous en avons conclu qu'il n'y avait pas assez de points de liaison au niveau de la cheminée de fées du fait de la distance, donc la reconstruction est impossible.

Nous avons alors essayé de reconstruire ces deux prises de vue de loin en utilisant la calibration de l'appareil photo en focale 24mm à 25m (« *InCal* ») pour aider l'orientation relative à se faire. Ceci n'a pas abouti, donc nous avons tenté de calculer l'orientation relative à l'aide de celle trouvée pour la focale 24mm de près et celle de la focale 100mm de loin (« *InOri* »), mais une fois encore cela n'a pas fonctionné, pour la même raison que précédemment.

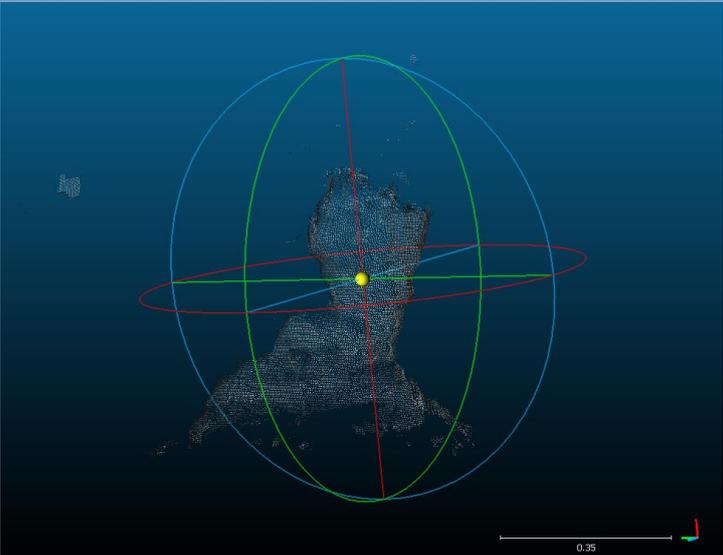
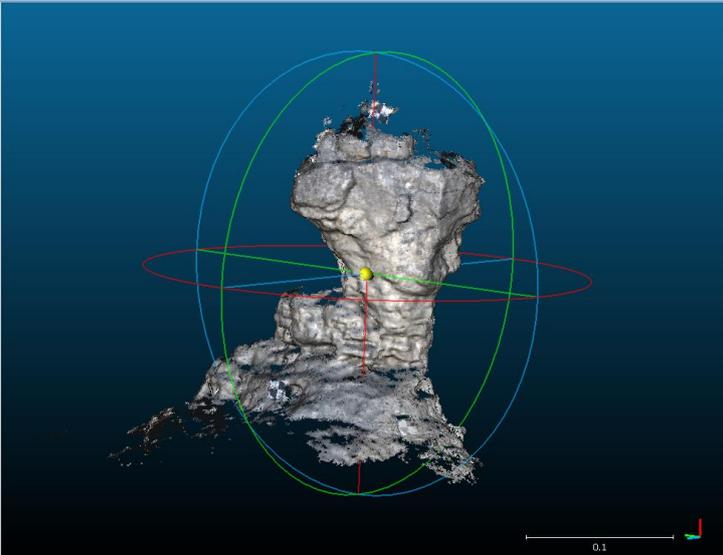
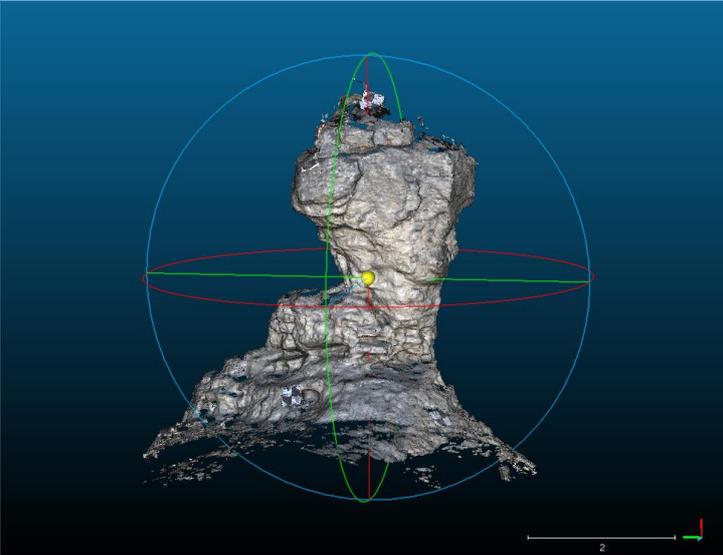


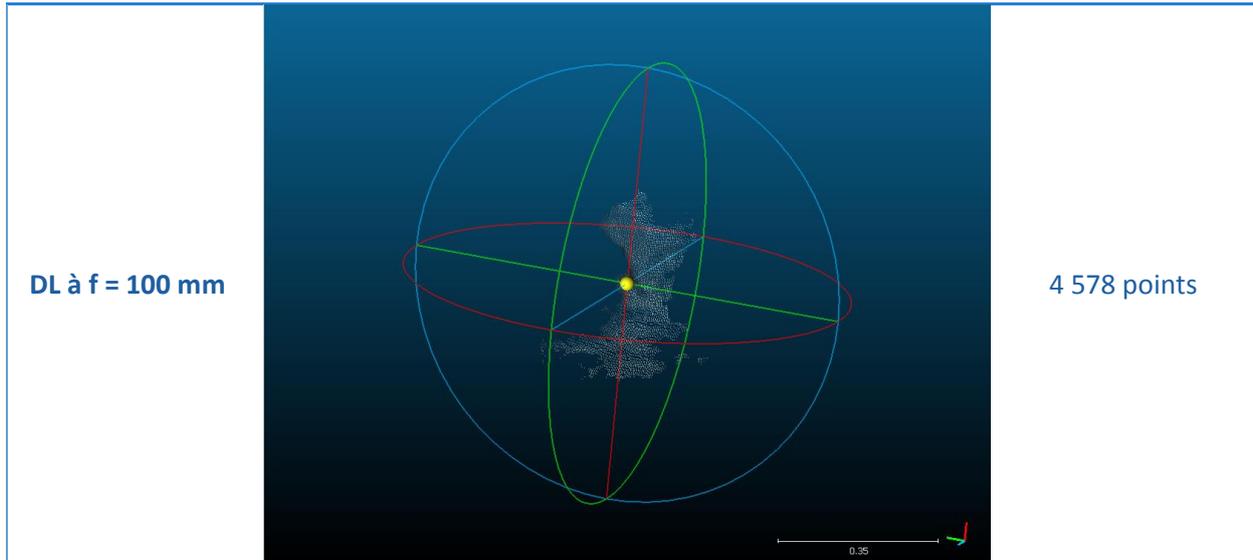
Visualisation de l'orientation relative en focale 24mm de loin



Récapitulatif des reconstructions 3D effectuées

Au niveau de la reconstruction 3D, on observe que plus la focale est grande et plus le nuage de points en résultant est optimum car la photo a moins de paysage environnant, elle est mieux adaptée à l'objet que l'on cherche à modéliser et donc il y a plus de détails sur la cheminée de fées. Quant à la prise de vue de loin en focale 24mm, le nuage de point est trop faible pour la reconstruction 3D du fait que la cheminée de fées ne ressort pas sur les images, on est trop loin de l'objet pour utiliser cette focale.

Prise de vue	Reconstruction 3D	Nombre de points reconstruits
DP à $f = 24$ mm		22 713 points
DP à $f = 100$ mm		372 125 points
DP à $f = 200$ mm		1 390 151 points



Pour éviter de réitérer le problème de radiométrie, nous avons décidé de changer l'ouverture ou le temps de pose des photos au cours de la prise de vue pour avoir une radiométrie plus homogène lors des prises de vue et donc favoriser la reconstruction. A priori, ces paramètres ne jouent que sur la radiométrie, et pas sur la géométrie. De ce fait, les images seront placées correctement sans avoir à faire une réorientation partielle.

3. Prieuré de Salagon

L'objectif de cette acquisition était de réitérer le protocole mis en place aux Mourres mais en prenant des distances plus petites pour comprendre comment obtenir des prises de vue de loin fonctionnelles. A l'aide d'un double mètre et d'une corde, nous avons modélisé les points de prise de photos autour d'un puits isolé dans un champ relativement dégagé près du prieuré de Salagon :

- A 5m : des piquets en cercle tous les 1m, soit 39 piquets → $f = 24\text{mm}$
- A 20m : des piquets en cercle tous les 4m, soit 36 piquets → $f = 24, 100, 200\text{mm}$
- A 50m : des piquets en cercle tous les 10m, soit 12 piquets → $f = 24, 100, 200, 400\text{mm}$

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'avoir des prises de vue régulières et de former des cercles quasi parfaits donc on observe facilement après la reconstruction si celle-ci a fonctionné ou si certaines images dérèglent la prise de vue.

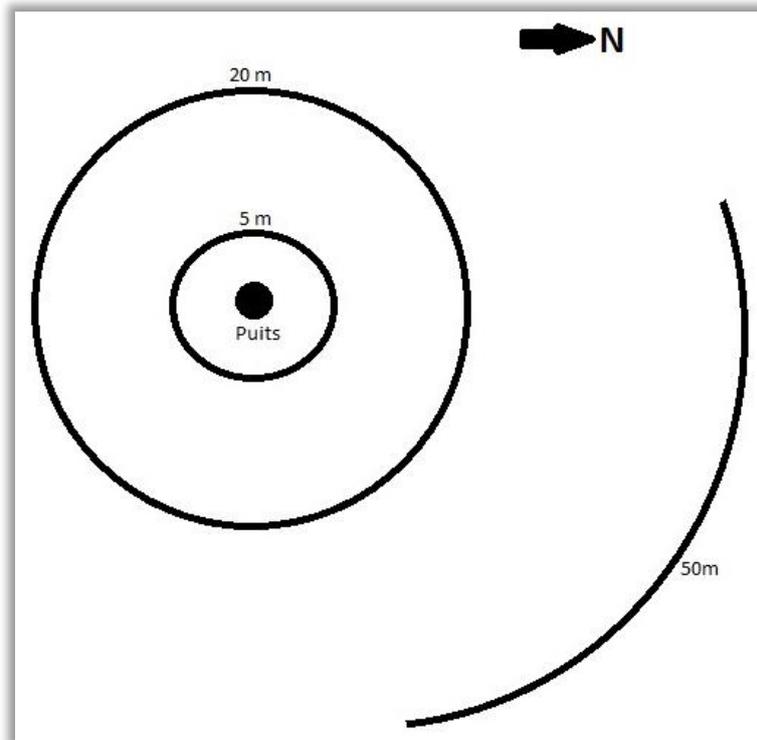
Afin d'obtenir une radiométrie homogène entre tous les clichés du puits, et notamment puisque les prises de vue font le tour complet de celui-ci, il a fallu mettre en place trois réglages différents de l'appareil photo pour une seule prise de vue, ainsi que l'on soit face ou dos au Soleil, le puits est toujours autant lumineux. On a donc une ouverture de 13 dos au Soleil, 20 lorsqu'on en est face et 16 sur le côté pour équilibrer entre la lumière et la pénombre.

Date : 24/07/2017

Conditions météorologiques : Journée ensoleillée mais quelques nuages par moment. Beaucoup de vent, 80km/h de mistral annoncé à la météo. Entre le début et la fin des acquisitions photos, la température a augmenté de $T=24^{\circ}\text{C}$ à $T=26^{\circ}\text{C}$. Alt = 442m

Réglages de l'appareil photo : 8 prises de vue à 5m, 20m et 50m

- Canon Mark III avec et sans téléobjectif
- Focale : 24mm, 100mm, 200mm, 400mm
- ISO : 100
- Ouverture : 13 pour la face à l'ombre, 20 pour la face au soleil et 16 en intermédiaire
- Temps de pose : 1/100s

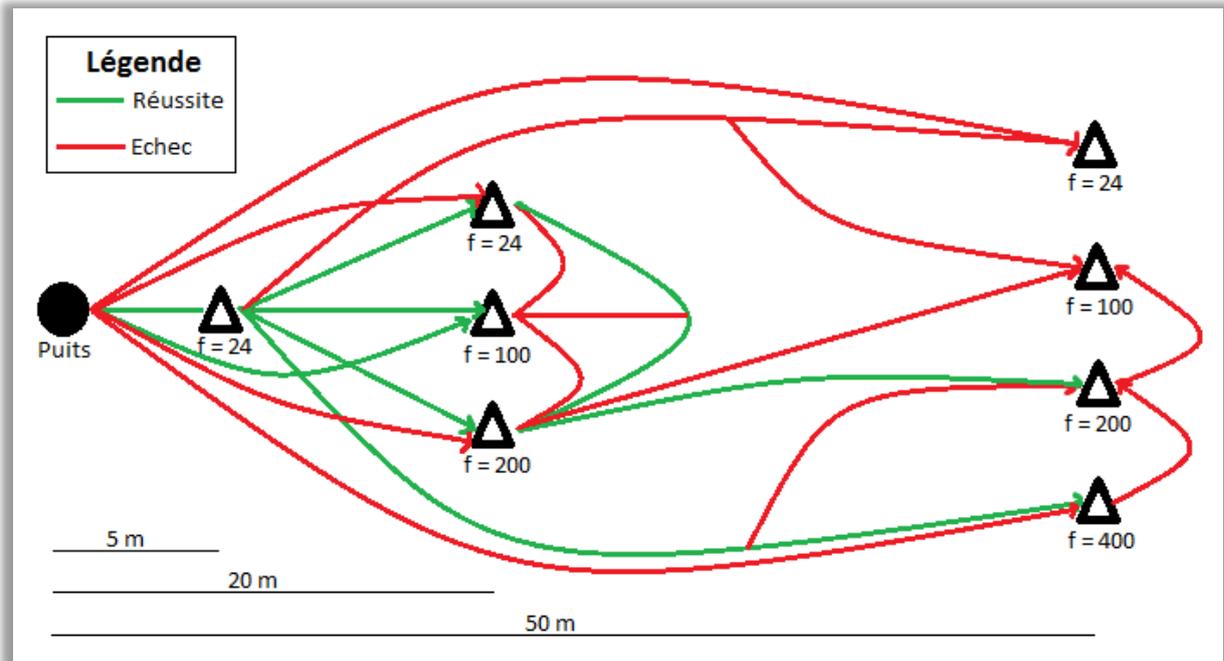


Disposition du chantier

Lorsqu'on tente de reconstruire le puits en direct, seule la prise de vue à 5m fonctionne correctement d'elle-même. Pour les prises de vue à 20m, le puits est trop petit en focale 24mm donc il n'y a pas assez de points de liaison trouvés, puis il y a des problèmes de calibration des focales 100mm et 200mm. Quant à celles à 50m, le puits est toujours trop petit avec la focale 24mm et il y a une distorsion radiale trop forte aux focales 100, 200 et 400mm.

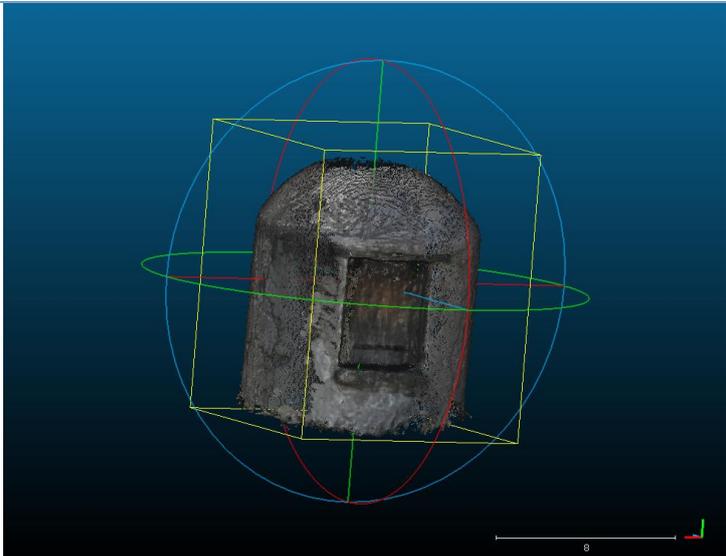
Cependant, il est possible de contourner le problème en calculant les reconstructions 3D à partir des calibrations ou des orientations qui ont fonctionné précédemment, principalement avec les images de focale à 24mm prises à 5m.

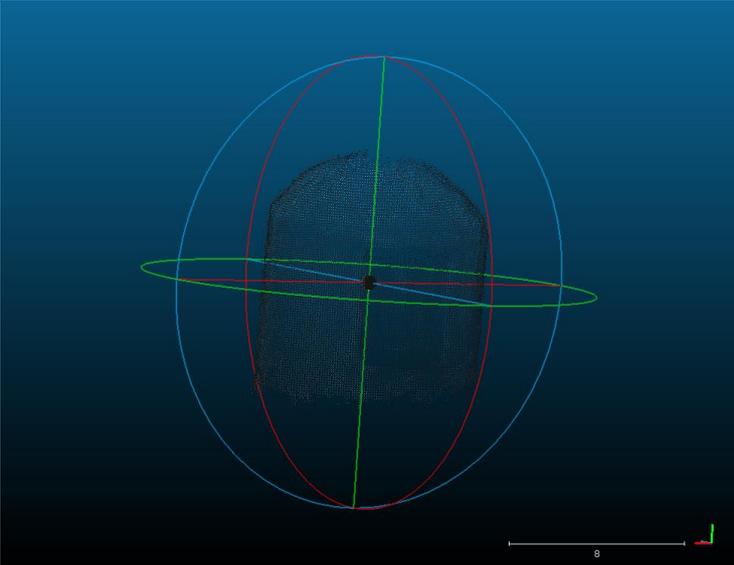
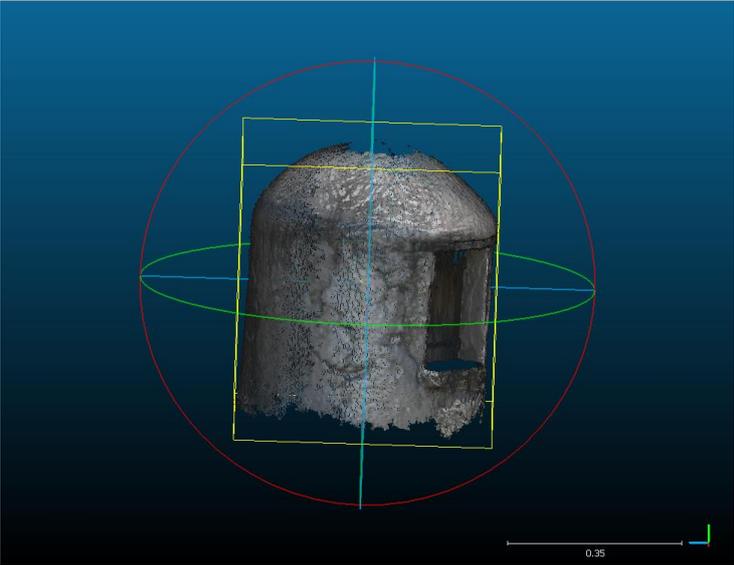
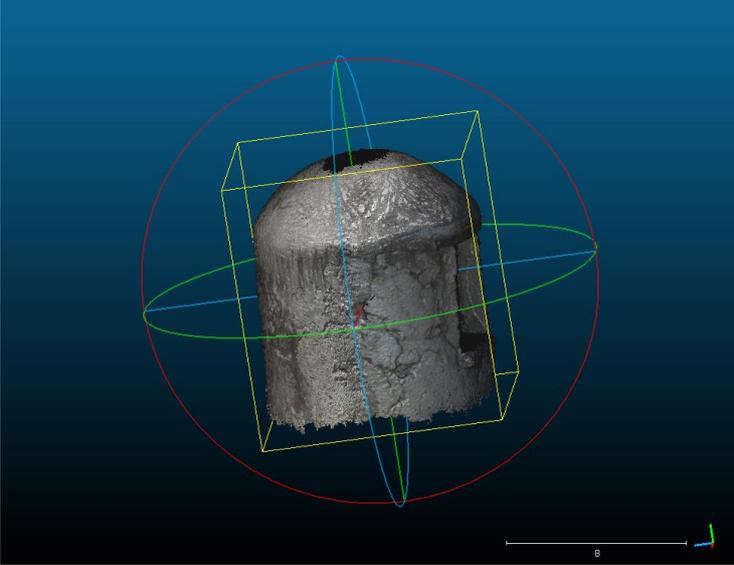
Au niveau des reconstructions 3D, la prise de vue à 20m en focale 100mm ne fonctionnait pas, même en contournant le problème mêlant les images à celles de la prise de vue à 5m en focale 24mm, alors que le reste des prises de vue à 20m fonctionnent. Nous avons donc décidé de retourner prendre des photos du puits pour les prises de vue à 20m en focale 100mm et à 5m en focale 24mm. L'idée était ici de vérifier si le problème venait de la radiométrie car certaines images étaient très claires, comparées aux autres prises de vue. Et en effet, avec les nouvelles photos, on arrive à reconstruire le puits à 20m avec la focale 100mm en se servant de la prise de vue à 5m.

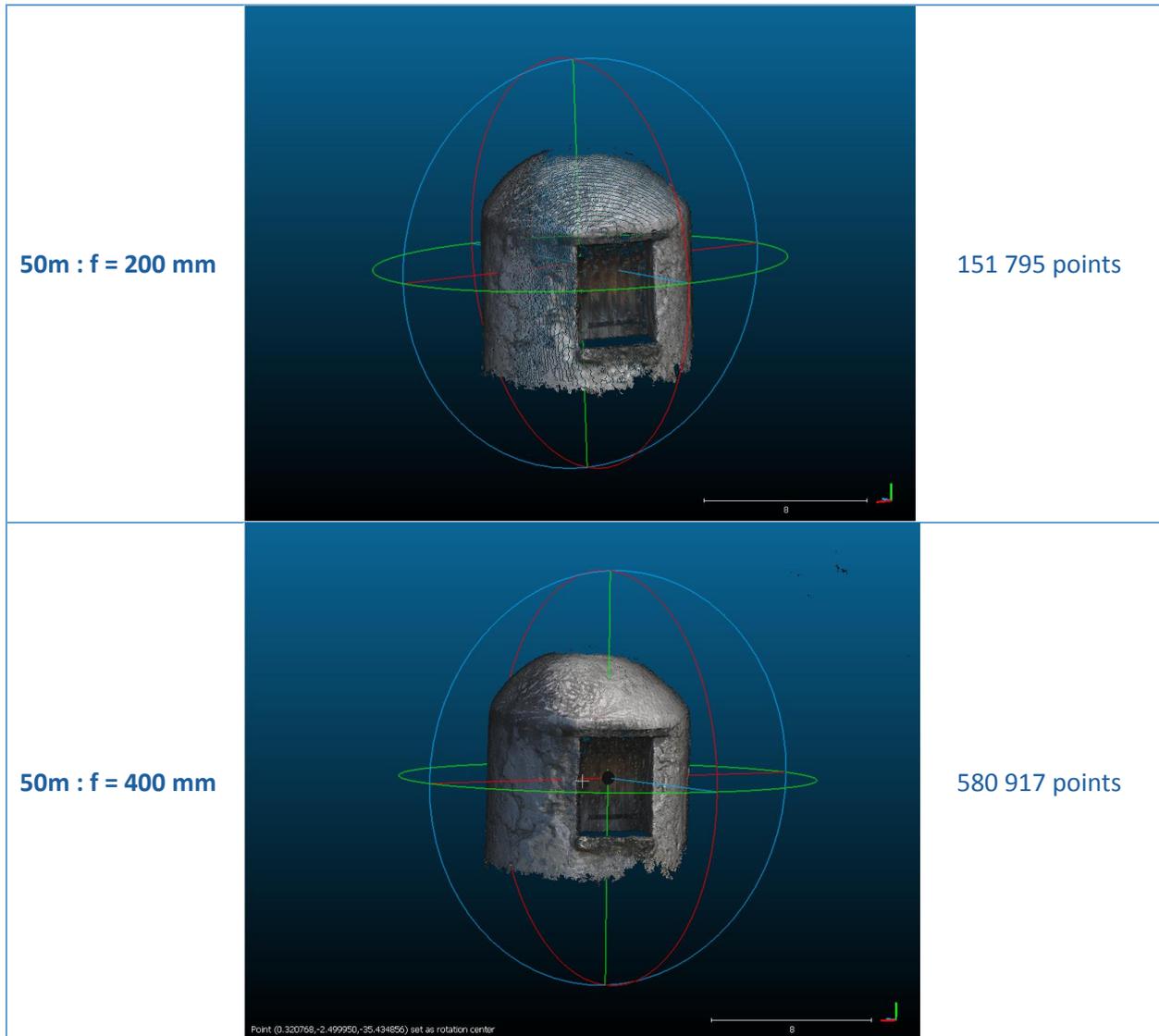


Récapitulatif des reconstructions 3D effectuées

Comme pour les Mourres, plus la focale est grande et plus le nuage de points résultant est optimum et donc plus il y a de détails sur le puits. Cependant, les reconstructions étant successives, si on reconstruit l'objet en intégrant aussi les photos qui ont permis d'orienter les focales de loin, on observe que le nombre de points reconstruits est beaucoup plus grand pour les cas où le puits était très petit sur l'image. Par exemple, dans le cas de la focale 24mm à 20m, le nombre de points passe de 23 028 à 390 735 et on obtient une reconstruction plus proche de celle de la focale 24mm à 5m. Avec les grandes focales comme 400mm, le nombre de points ne varie quasiment pas, on perd même de l'information en passant de 580 917 à 580 747 points à cause de la calibration.

Prise de vue	Reconstruction 3D	Nombre de points reconstruits
5m : f = 24 mm		369 677 points

<p>20m : f = 24 mm</p>		<p>23 028 points</p>
<p>20m : f = 100 mm</p>		<p>303 951 points</p>
<p>20m : f = 200 mm</p>		<p>1 536 299 points</p>



Enfin, contrairement à ce que l'on pensait, le fait que l'objet soit le plus gros possible sur le cliché n'a pas permis d'effectuer une reconstruction directe, comme pour la prise de vue à 20m en focale 100mm qui ne fonctionne pas tandis que celle à 5m en focale 24mm fonctionne directement alors que le puits a la même taille sur les images. Cela montre que la reconstruction 3D qui a fonctionné à 130m avec la focale 100mm aux Mourres était un « coup de chance » car on ne peut pas réitérer ce succès.

C'est alors que le lien entre le recouvrement et les angles d'intersection des sommets de prise de vue de loin nous est apparu. Bien que, sur les photos l'objet semble similaire, les angles formés entre un détail du puits et les sommets de prises de vue sont de plus en plus petits à mesure qu'on s'en éloigne, et même si le recouvrement reste identique. De ce fait, MicMac ne retrouve pas le même nombre de points de liaison donc la reconstruction 3D devient difficile et si ce nombre est trop faible, on a alors une reconstruction impossible (cf. *Partie II-2*).

Nous en avons conclu que, de loin, une petite focale ne fonctionne pas, il faut toujours avoir l'objet que l'on cherche à photographier le plus gros possible sur les prises de vue, ainsi on a un

maximum de points de liaison et donc une meilleure résolution. Nous cherchons maintenant à expliciter le lien entre le recouvrement et les angles d'intersection des sommets de prise de vue.

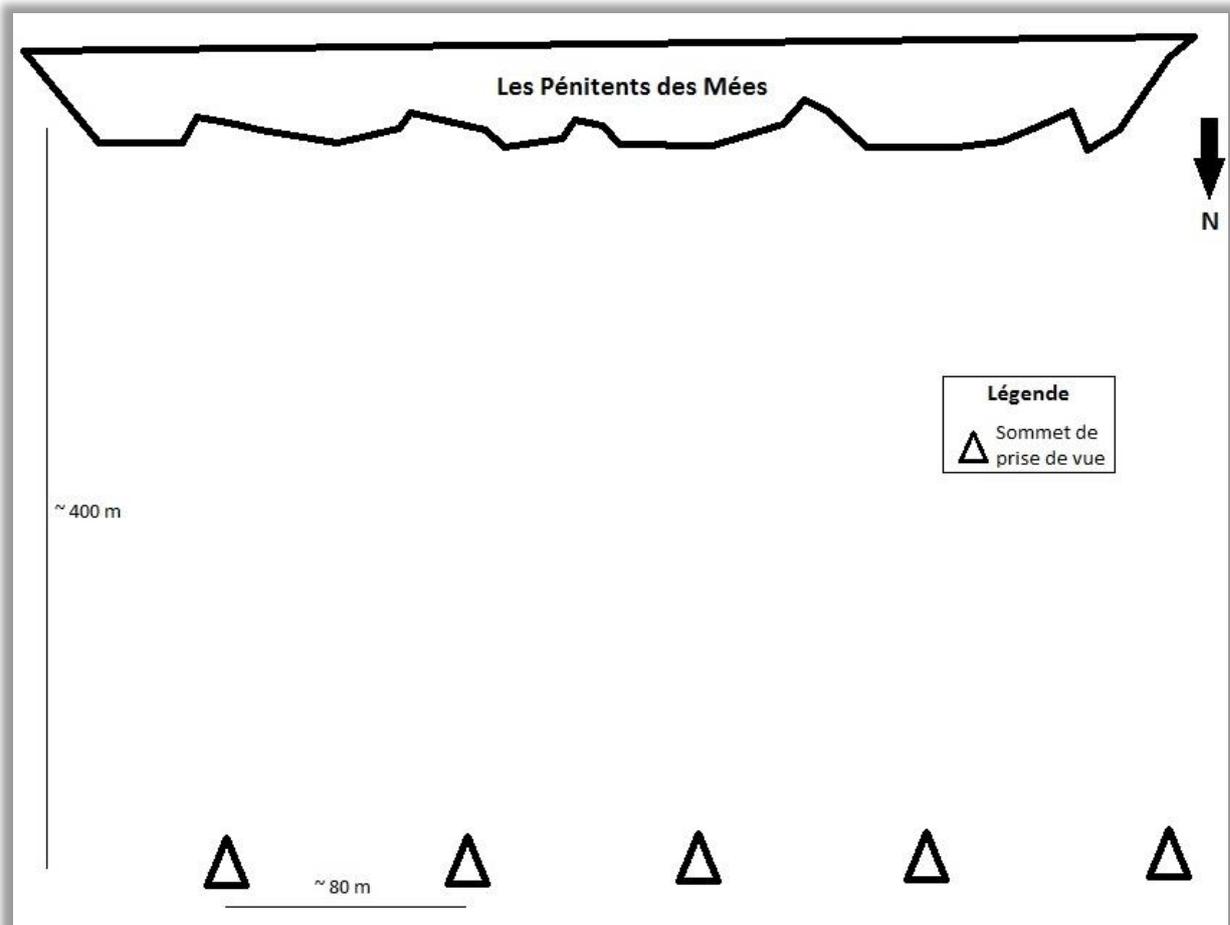
Pour avoir un meilleur recouvrement, nous proposons de procéder à un « balayage » de l'objet que l'on cherche à reconstruire, ce qui permettrait de s'affranchir du problème des angles d'intersection des sommets de prise de vue.

4. Les Mées

L'objectif de cette acquisition est de mettre en place un système que nous avons qualifié de « balayage » pour obtenir des images supplémentaires offrant un meilleur recouvrement et surtout des angles plus grands au niveau de l'intersection entre les sommets de points de vue et les points de liaison. On a donc placé 5 sommets de prises de vue à 400m des Pénitents, à partir desquels 3 photos ont été faites : un détail au centre de l'image, une avec ce même détail décalé à droite et de même à gauche ; et ce toujours en visant le même détail lorsqu'on change de sommet de prise de vue.

Date : 27/07/2017

Conditions météorologiques : Journée ensoleillée et chaude ($T=26^{\circ}\text{C}$) avec beaucoup de vent (mistral). Alt = 440m sur le lieu des photos mais 550m en haut des Pénitents.

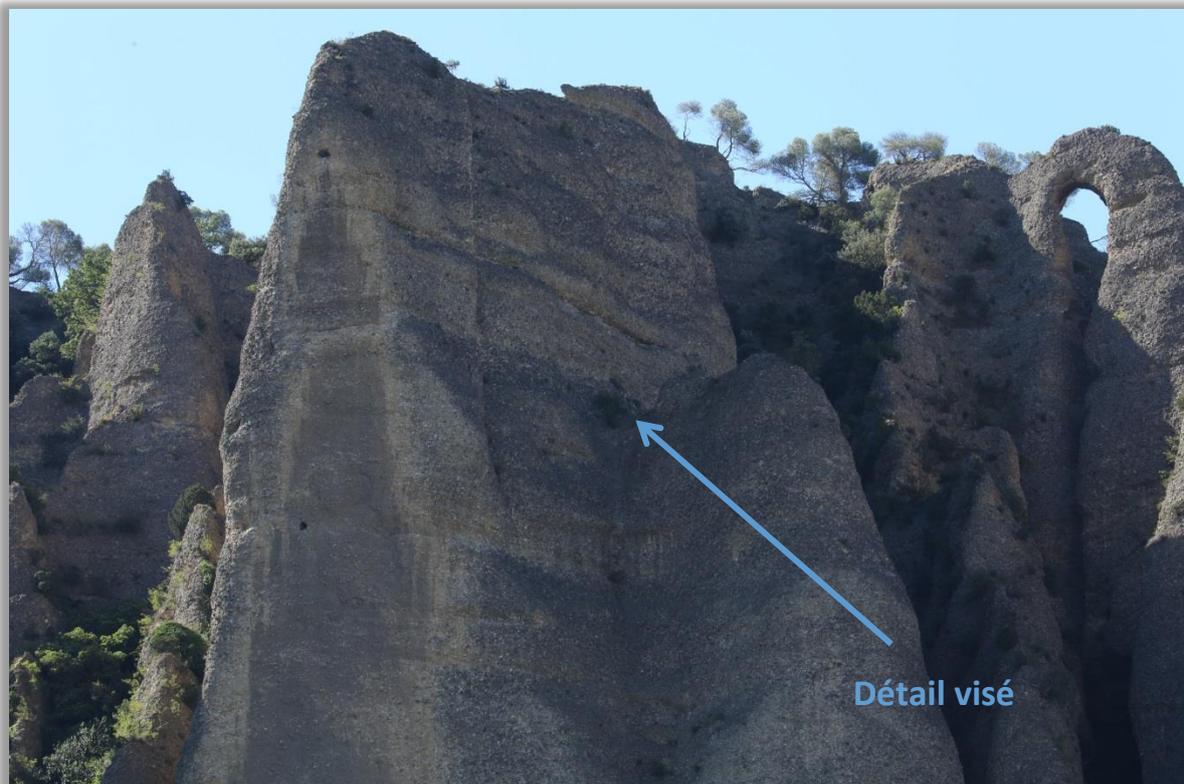


Disposition du chantier

Réglages de l'appareil photo : 5 prises de vue à 400m environ du haut des Pénitents

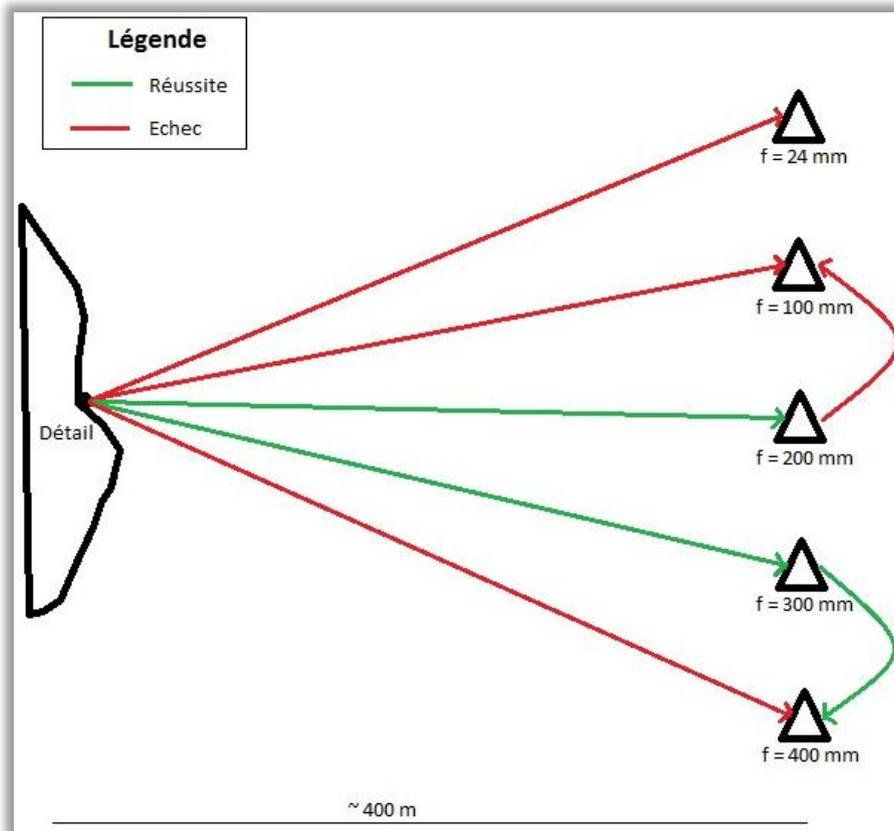
- Canon Mark III avec et sans téléobjectif
- Focale : 24mm, 100mm, 200mm, 300mm, 400mm
- ISO : 100
- Ouverture : 20
- Temps de pose : 1/25s

Lors de l'acquisition, nous avons choisi de prendre un maximum de prises de vue avec des focales différentes pour pouvoir pousser notre protocole au mieux et pouvoir obtenir des reconstructions 3D de prises de vue de loin sans reconstructions successives. Or, rien qu'en observant les photos prises, on peut présupposer que la prise de vue à la focale 24mm ne va pas fonctionner car le détail est très loin et donc MicMac n'arrivera certainement pas à reconstruire la façade qui nous intéresse.



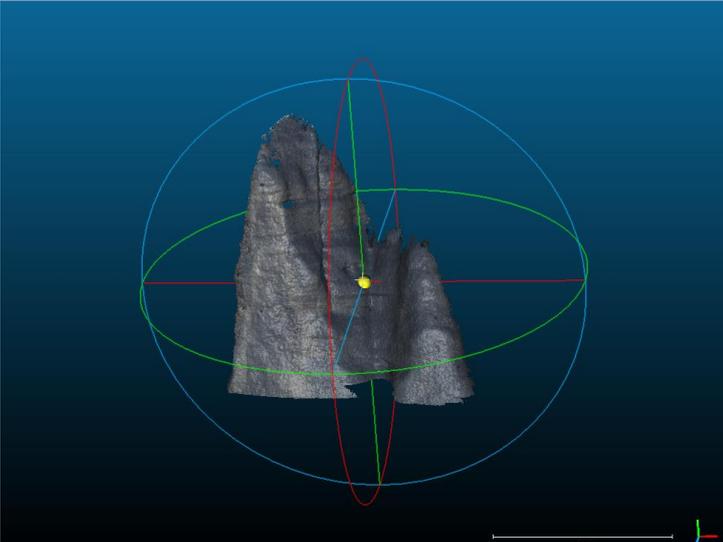
Formation rocheuse à reconstruire, photo prise avec la focale 200mm

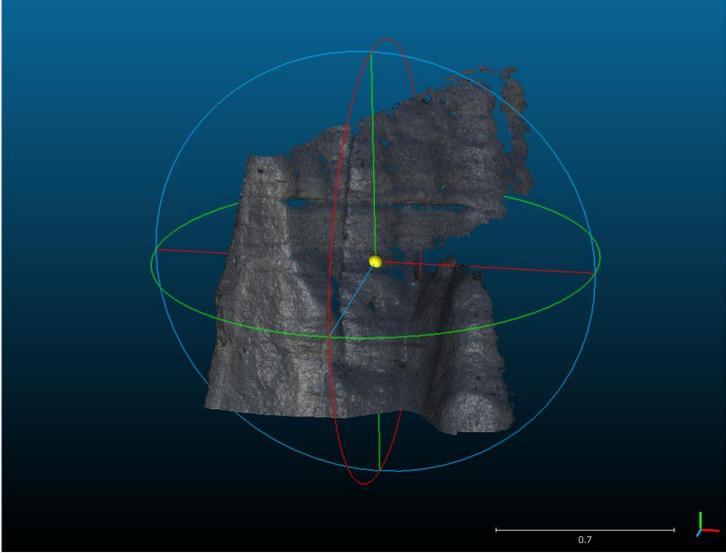
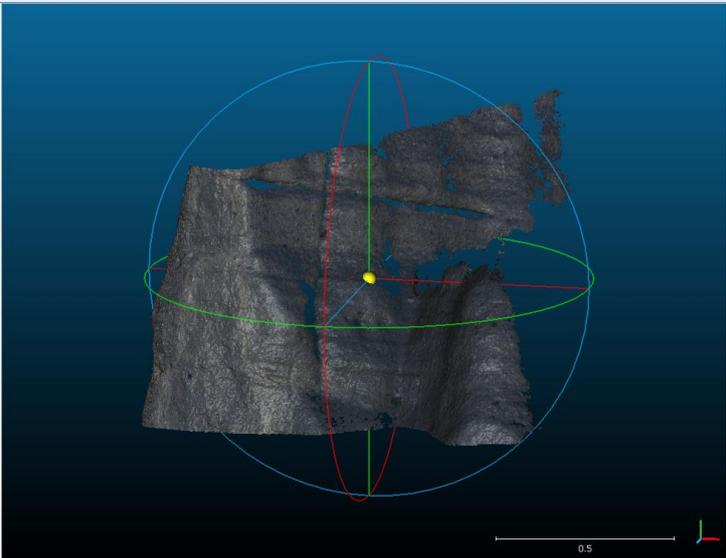
Un fois les traitements MicMac lancés, notre première supposition quant à la focale 24mm s'est avérée exacte, elle ne fonctionne pas. Cependant, seules les prises de vue aux focales 200mm et 300mm ont été reconstruites directement. Pour celles à 100mm et 400mm, nous avons dû utiliser les orientations relatives des prises de vue qui avaient fonctionné mais uniquement la dernière a abouti. Ceci s'explique par le fait que les photos prises en focale 400mm ne permettent pas de voir la façade des Pénitents en entier et donc l'orientation relative n'a pas pu trouver assez de points de liaison pour la reconstruction. Quant aux photos prises en focale 100mm, c'est l'inverse, l'objet n'est pas assez grand devant le reste des Pénitents donc la reconstruction était trop difficile : les sommets de prise de vue ne sont pas replacés au bon endroit.



Récapitulatif des reconstructions 3D effectuées

Au niveau des reconstructions 3D en elles-mêmes, on remarque que le nombre de points reconstruits par cette méthode est très important, même lorsque la reconstruction de loin a été faite en directe. Néanmoins, on ne peut pas réellement comparer ces données car l'emprise varie sur la reconstruction globale.

Prise de vue	Reconstruction 3D	Nombre de points reconstruits
f = 200 mm		587 046 points

<p>f = 300 mm</p>		<p>1 186 185 points</p>
<p>f = 400 mm</p>		<p>1 570 374 points</p>

Finalement, le protocole du balayage est un succès pour les prises de vue de loin sans l'utilisation de prises de vue de près. Cette méthode nous permet proposer une alternative au protocole photogrammétrique jusque-là utilisé dans nos précédentes acquisitions. De plus, nous n'avons pas été confrontés au problème lié au lien entre le recouvrement et les angles d'intersection des sommets de prise de vue. Il faut simplement prendre garde à avoir l'objet le plus grand possible sur les photos tout en veillant à ce qu'il soit entier ; mais nous avons déjà conjecturé à ce sujet précédemment, il s'agit surtout d'une vérification.

5. Pierrerue

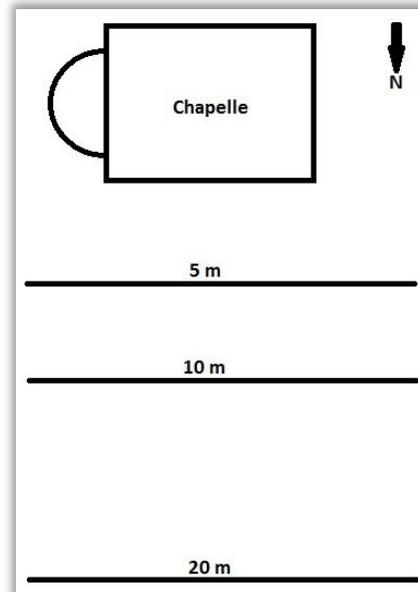
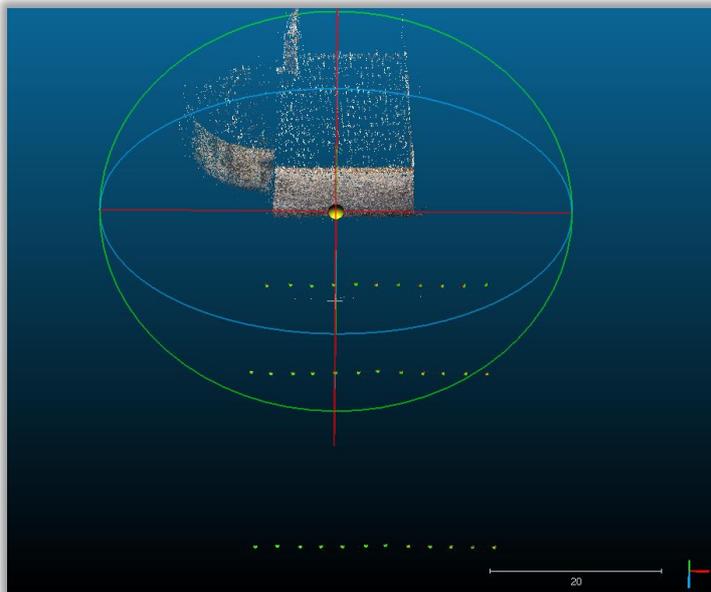
L'acquisition effectuée à la Chapelle de Pierrerue se divise en deux parties : l'objectif était de trouver le juste équilibre entre le recouvrement et l'angle d'intersection des sommets de prise de vue et de comparer cette méthode avec celle du balayage. Nous avons donc pris des photos avec uniquement la focale 24mm d'une façade, avec des prises de vue de face et des balayages, le tout pour des distances de 5, 10 et 20m. Pour cela, nous avons planté des 12 piquets parallèlement à la longueur du mur, tous écartés de 1m.

Date : 27/07/2017

Conditions météorologiques : Journée ensoleillée et chaude (T=26°C) avec beaucoup de vent (Mistral). Alt = 510m

Réglages de l'appareil photo : 6 prises de vue à 5m, 10m et 20m

- Canon Mark III sans téléobjectif
- Focale : 24mm
- ISO : 100
- Ouverture : 14
- Temps de pose : 1/25s



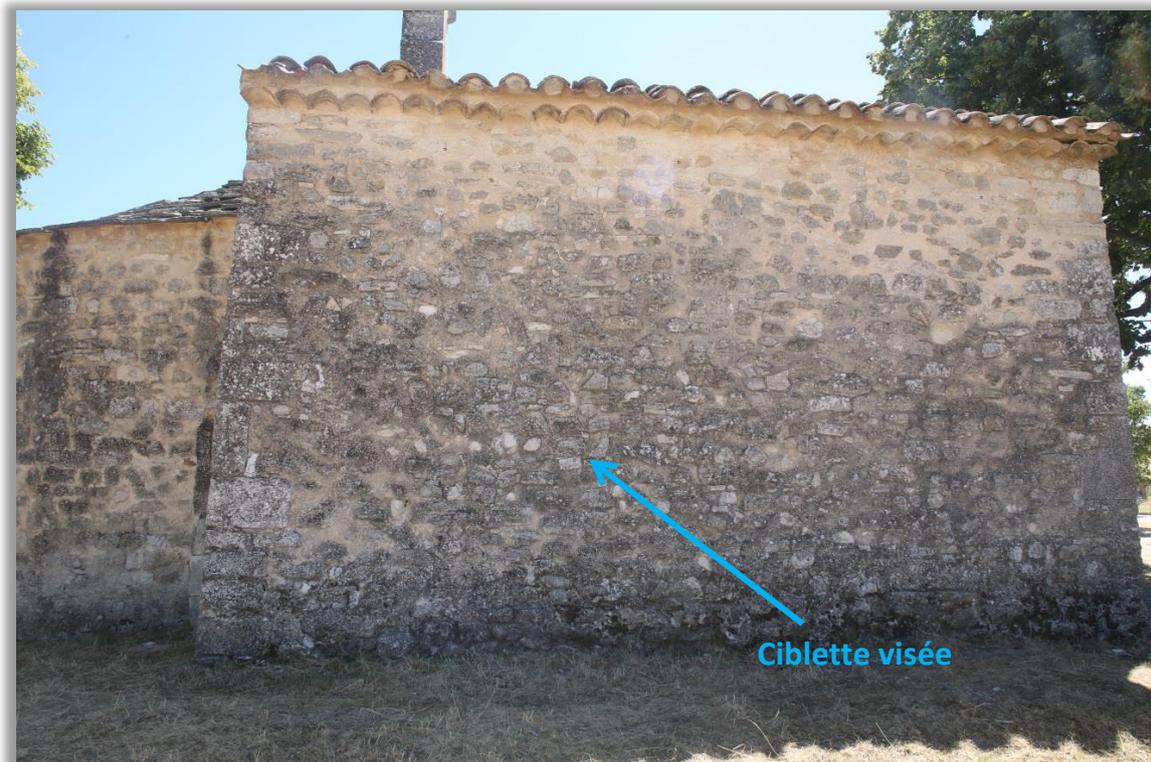
Positionnement des piquets et disposition du chantier

a. Balayage

Pour le « balayage » de la Chapelle, nous avons choisi comme point de détail une ciblette déjà positionnée au centre de la façade (mis en place dans le cadre d'un projet de photogrammétrie architecturale). Contrairement à la méthode utilisée aux Mées, nous avons ici choisi de prendre une seule image par piquet, en visant à chaque fois la ciblette, ce qui permettait d'acquérir la façade dans son intégralité quasiment à chaque fois et donc une reconstitution complète.



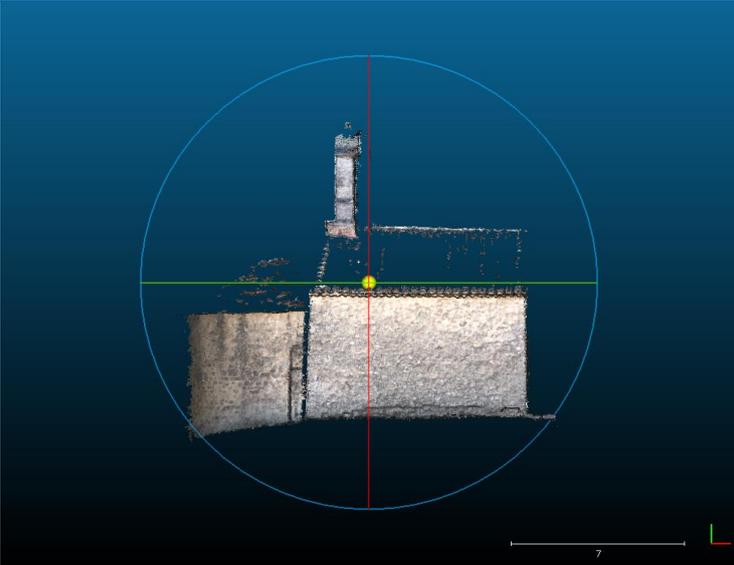
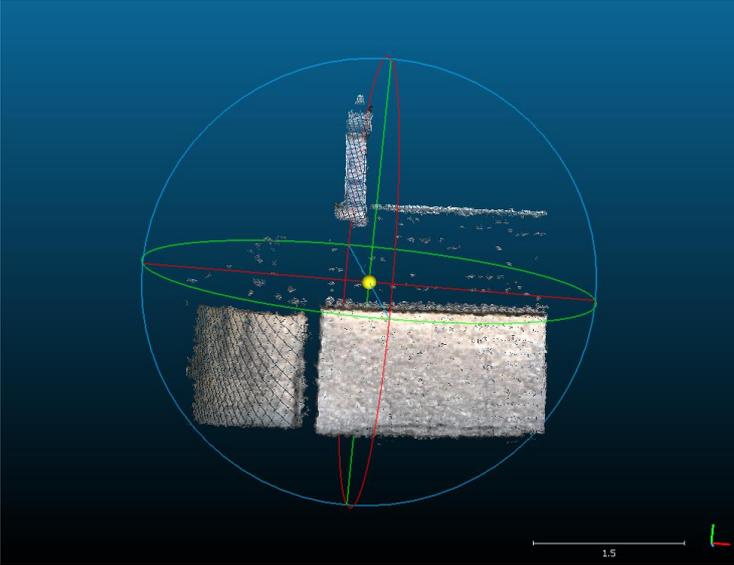
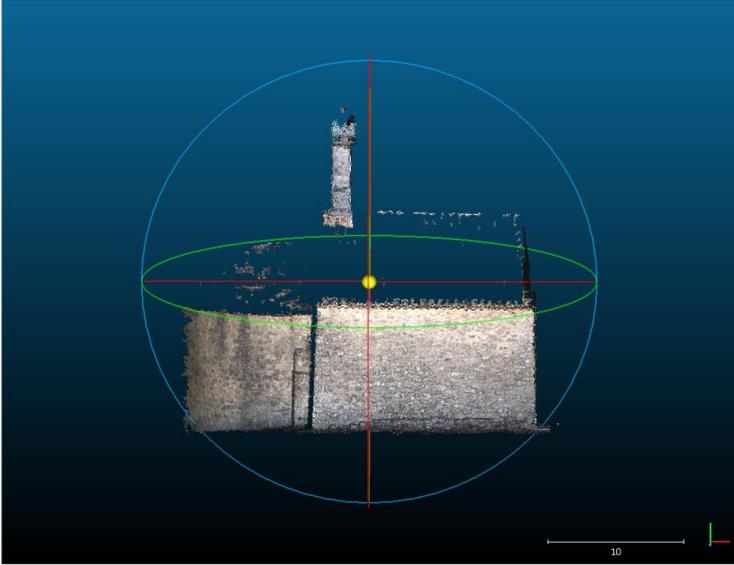
Position de la ciblette



Façade à reconstruire, photo prise à 5m

Toutes les acquisitions ont fonctionné directement et le nombre de points reconstruits est considérable, bien qu'il diminue avec la distance séparant la façade des sommets de prise de vue, ce qui reste logique car l'objet est de plus en plus petit étant donné qu'on travaille en focale 24mm. Cependant, plus on s'éloigne et plus on perd de détails, mais plus la reconstruction est vaste : le toit et le clocher sont mieux reconstruits.

Prise de vue	Reconstruction 3D	Nombre de points reconstruits
<p>f = 24 mm à 5 m</p>		<p><u>Total :</u> 1 198 528 points</p> <p><u>Façade :</u> 862 800 points</p>

<p>f = 24 mm à 10 m</p>		<p><u>Total :</u> 335 644 points</p> <p><u>Façade :</u> 229 760 points</p>
<p>f = 24 mm à 20 m</p>		<p><u>Total :</u> 88 726 points</p> <p><u>Façade :</u> 29 136 points</p>
<p>Global *</p>		<p><u>Total :</u> 1 188 687 points</p> <p><u>Façade :</u> 855 789 points</p>

* La prise de vue « globale » rassemble toutes les photos à la fois pour le nuage de points et pour la reconstruction 3D.

Lorsqu'on s'intéresse à la reconstruction globale en balayage, on observe qu'elle permet de tirer le meilleur des prises de vue à 5m et à 20m même si on perd un peu de détails par rapport à la prise de vue la plus proche (5m) à cause de la recalibration nécessaire pour pouvoir orienter toutes les images entre elles.

Finalement, la méthode du balayage fonctionne bien de près comme de loin, et d'autant plus lorsqu'on combine les deux prises de vue, tant que l'objet est entièrement capturé dans les clichés.

b. Prises de vue de face

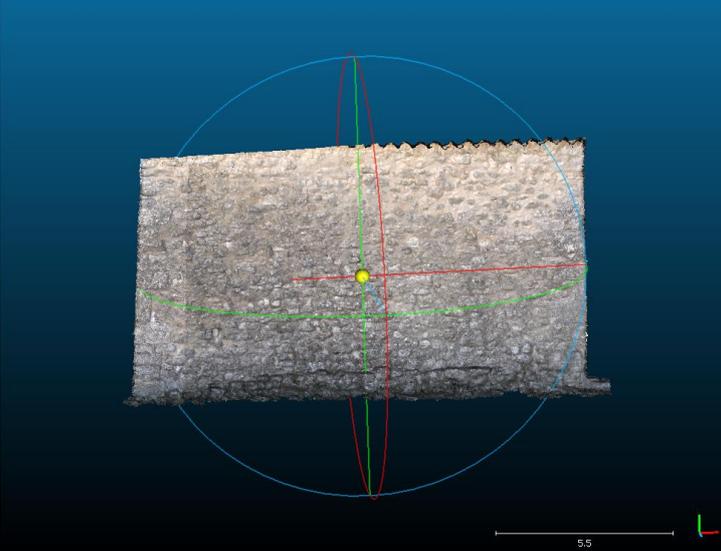
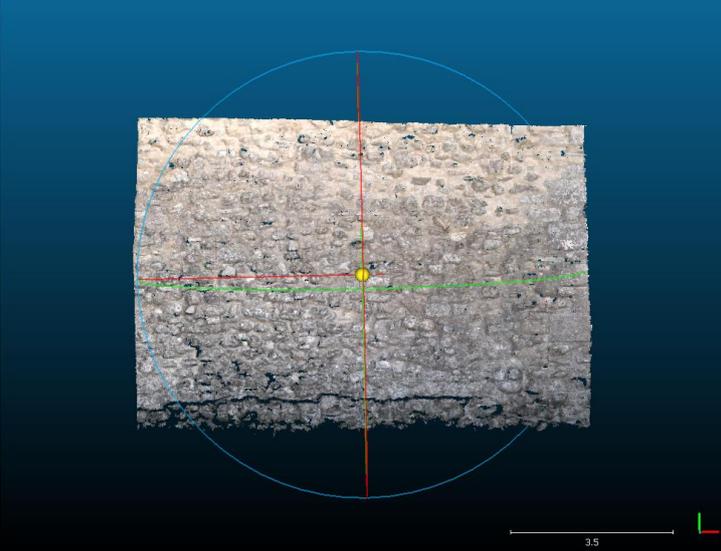
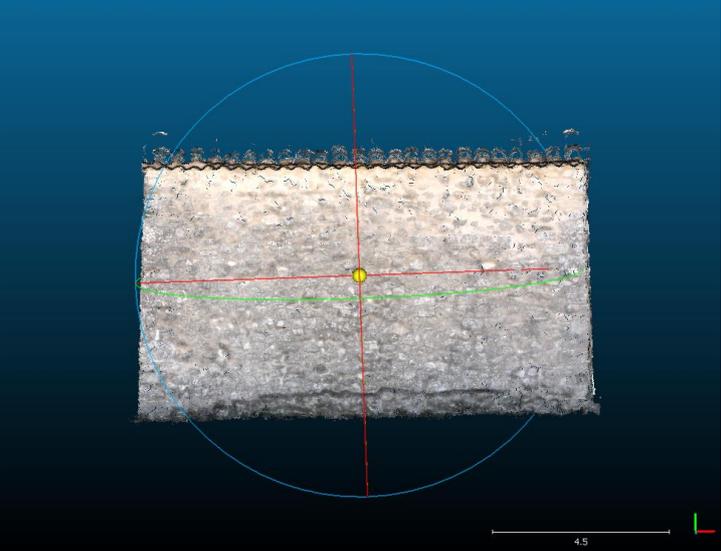
L'objectif des prises de vue de face est de pouvoir choisir des bases de tailles différentes, à savoir l'écart entre les sommets de prises de vue, afin d'en déduire des statistiques sur les résultats en fonction du recouvrement, du nombre de points de liaison trouvés et utilisés, ainsi que de l'angle d'intersection en fonction de la distance à l'objet.

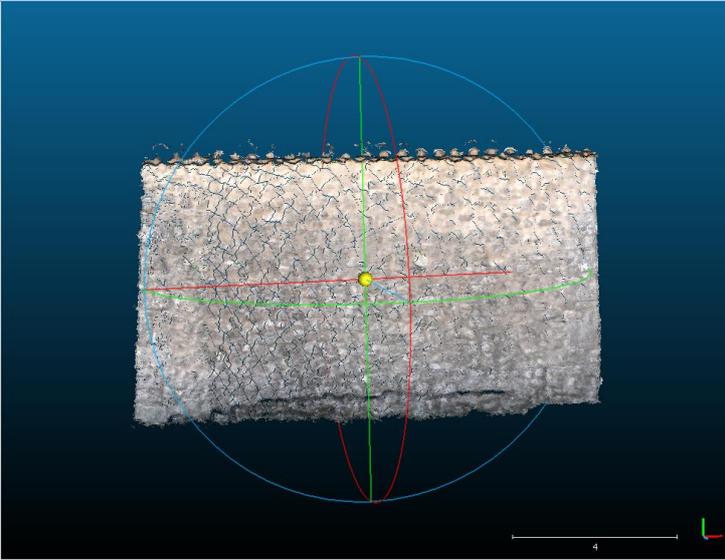
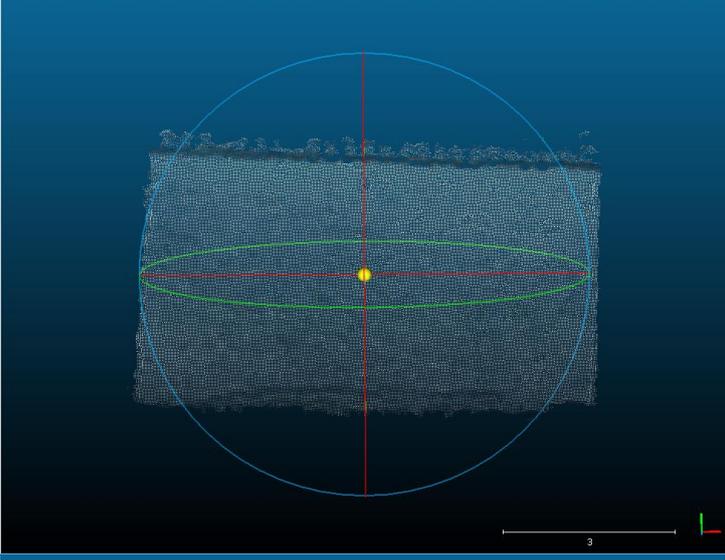
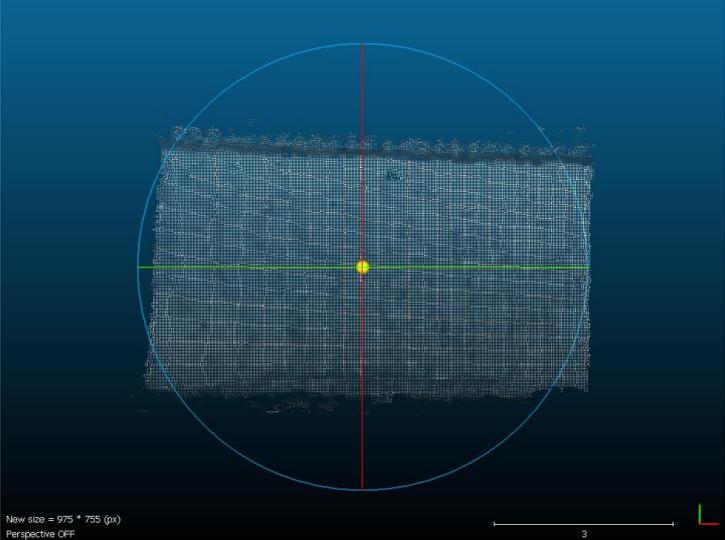
Les prises de vue correspondent à des prises de vue de près à 20m au maximum donc nous avons la certitude qu'elles fonctionneraient de la même façon que pour les acquisitions précédentes. De ce fait, il nous était facile de changer la base entre les sommets de prise de vue pour pouvoir mettre en évidence le lien entre le recouvrement et l'angle d'intersection des sommets de prise de vue. Etant donné que nous avons pris un cliché à chaque emplacement de piquet, nous avons initialement des prises de vue en base 1m, et donc pour avoir des prises de vue aux bases plus grandes, il suffit de supprimer des photos dans le calcul de reconstruction sur MicMac. Cependant, pour une base de 5m à 5m de la façade, il n'y a pas assez de recouvrement entre les photos pour la reconstruire.

Nombre de points de liaisons		Distance		
		5 m	10 m	20 m
Base	1 m	132 063	57 601	16 869
	2 m	49 572	25 240	7 260
	3 m	23 434	14 361	4 430
	4 m	8 534	9 037	2 881
	5 m		8 677	2 888

Nombre de points reconstruits		Distance		
		5 m	10 m	20 m
Base	1 m	901 540	246 048	56 841
	2 m	852 491	236 128	60 599
	3 m	826 003	230 205	55 934
	4 m	608 741	218 499	58 162
	5 m		218 811	56 751

Au niveau des reconstructions 3D, on observe facilement la diminution du nombre de points de liaisons et donc de points reconstruits en fonction de la distance car il se traduit par une perte d'informations : au départ, on perd simplement en détails mais puis on s'éloigne et plus le recouvrement et l'angle d'intersection des sommets de prise de vue diminuent, ce qui fournit une reconstruction partielle et inexploitable de la façade.

Prise de vue f = 24 mm	Reconstruction 3D	Remarques
<p>Distance : 5 m Base : 1 m</p>		<p>Façade complètement reconstruite avec beaucoup de détails</p>
<p>Distance : 5 m Base : 4 m</p>		<p>Les pierres sont toujours bien marquées et détaillées mais on a des trous dans la reconstruction en bas de la façade</p>
<p>Distance : 10 m Base : 1 m</p>		<p>Façade complètement reconstruite avec moins de détails marqués : les pierres sont lisses mais on voit bien la différence de radiométrie</p>

<p>Distance : 10 m Base : 4 m</p>		<p>Les détails sont toujours aussi marqués qu'en base 1m mais on observe des « vagues » sur la façade qui traduisent un manque d'information pour la reconstruction, ainsi que des trous sur le bas</p>
<p>Distance : 20 m Base : 1 m</p>		<p>La façade est entièrement reconstruite mais il n'y a plus de détail, ni relief ni radiométrie, et une transparence qui marque un manque d'information important</p>
<p>Distance : 20 m Base : 4 m</p>		<p>Présence de « vagues » sur la façade en plus de la transparence, ce qui montre très peu d'information lors de la reconstruction</p>

Ainsi, en faisant varier la base des sommets de prises de vue, la distance à l'objet et en ajoutant les variations de focale, on peut adapter la reconstruction au chantier de travail.

II. Protocoles photogrammétriques

Les prises de vues et reconstructions photogrammétriques effectuées précédemment ont mis en évidence que le protocole de photogrammétrie standard pour une prise de vue proche, entre 5m et 20m, pour des objets du monde qui ont une emprise d'environ 20m, fonctionne tout le temps. Ce protocole consiste à prendre une série de photographies de visée orthogonale au plan de prise de vue de l'objet. Elles sont séparées par une base répondant au critère d'au moins 10 degrés pour l'angle d'intersection. Ainsi, à 5m de distance à l'objet, on prendra une base entre les sommets de prise de vues de 1m.

En revanche, si les reconstitutions 3D des prises de vues proches fonctionnent sans trop de difficultés, il n'en va pas de même lorsque l'on s'éloigne à plus de vingt mètres. En nous basant sur des modèles théoriques ainsi que des observations pratiques, des protocoles de prises de vues éloignées ont donc été établis.

1. Reconstruction successive

Ce premier protocole est issu des expériences effectuées à la Montagne de Lure et aux Mourres. C'est lors de ces premières acquisitions que la nécessité d'un protocole spécial est apparue pour les prises de vues lointaines (350m et 130m dans ces cas précis), car il a été impossible de reconstituer à cette distance un objet ou une partie du paysage comme il serait fait pour un objet proche, à une dizaine de mètres. En effet, un premier problème se pose pour ces prises de vues : le manque de détails sur les objets observés empêche la création de points de liaison sur l'objet cible. Quant à l'arrière-plan, des points de liaison sont bien créés, mais ils ne peuvent pas être exploités car le recouvrement entre deux images y est trop faible (cf. le recouvrement bleu sur le schéma).

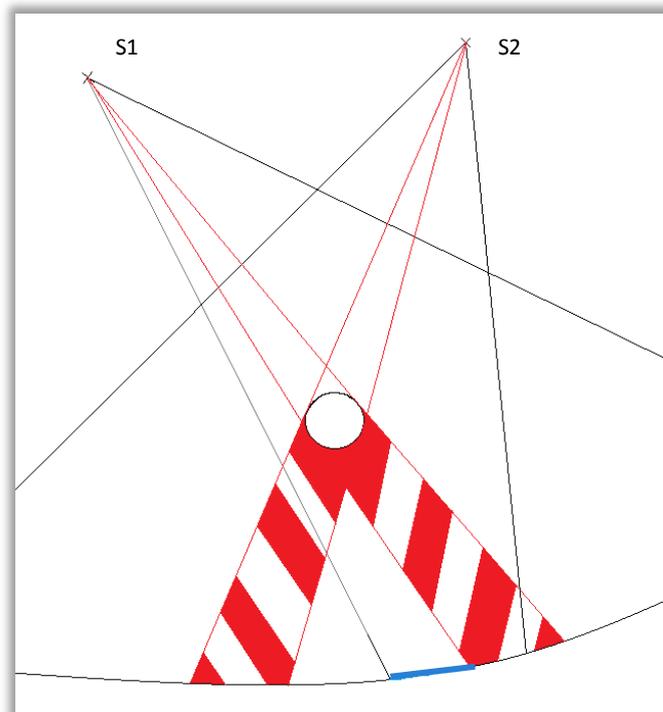
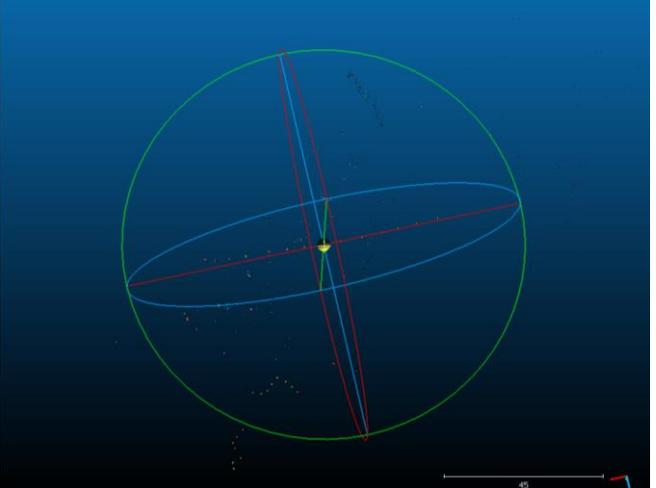
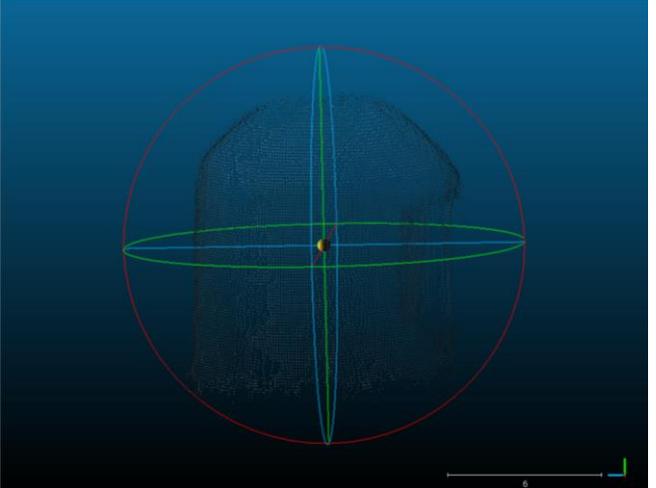
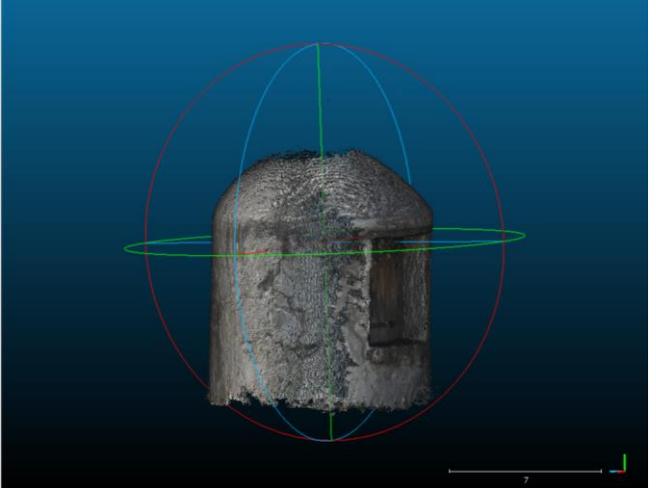


Illustration du recouvrement sur un arrière-plan

Pour contourner cette difficulté, on peut s'appuyer sur des prises de vues plus proches de l'objet pour positionner les prises de vues lointaines. L'objet cible est ainsi reconstitué par le logiciel MicMac grâce à la calibration d'une prise de vue plus proche ou avec la calibration et l'orientation relative de celle-ci. Il est préférable de choisir une prise de vue de près dont l'objet est le plus grand possible sur l'image résultante et l'idéal est que la prise de vue de loin ait un rendu photographique similaire, même si un zoom ou une focale plus grande a été utilisé.

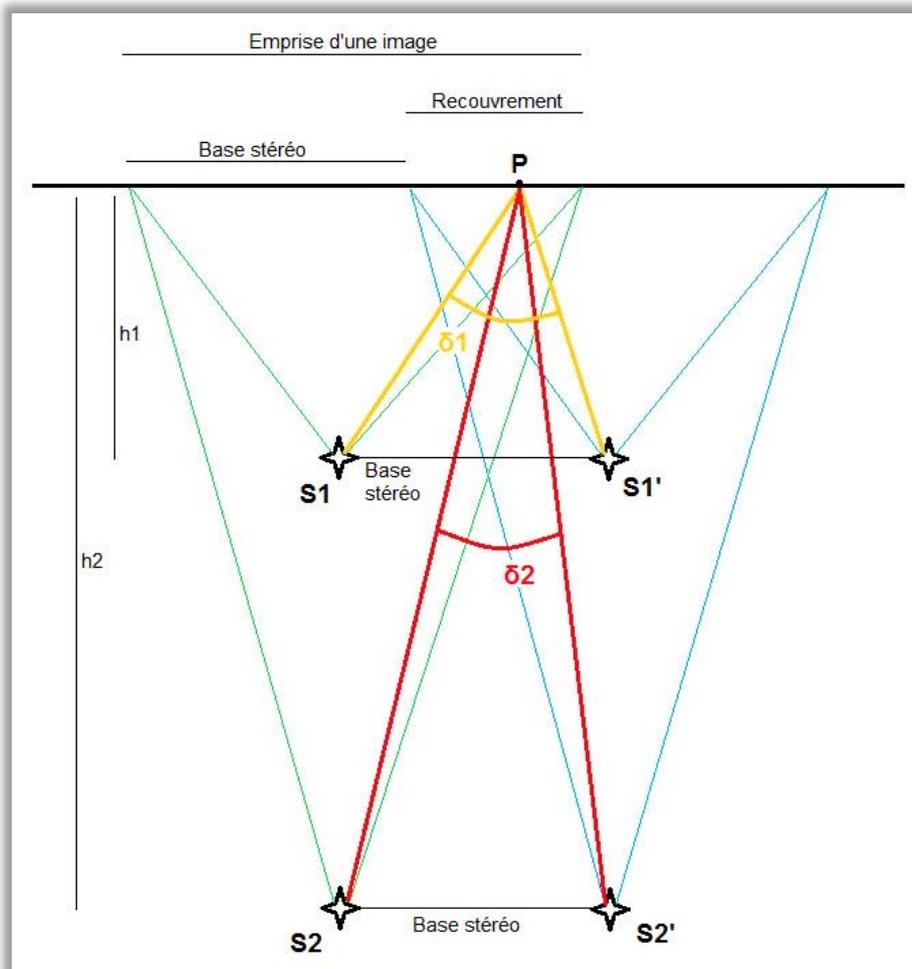
Prise de vue de loin	Reconstruction
<p>En direct : les points rouges et verts représentent les sommets de prise de vue. Normalement on devrait avoir un cercle autour du puits en nuage de points.</p>	
<p>Avec calibration et orientation relative par rapport à une prise de vue de près. Le nombre de points reconstruits est très faible car l'objet est loin. 23 028 points reconstruits</p>	
<p>Cumul des prises de vue DP et DL. On a une reconstruction exploitable avec des détails et une radiométrie apparente. 390 735 points reconstruits</p>	

Le résultat dépend des commandes entrées dans MicMac : plus on ajoute de photos dans la reconstruction 3D et plus celle-ci sera importante et réaliste, comme dans l'exemple précédent.

Ainsi, bien que l'on obtienne de meilleurs résultats en traitant les prises lointaines à partir des proches, d'où le nom de reconstructions successives, certaines prises de vue ne peuvent pas être orientées dans MicMac avec cette méthode uniquement (cf. Partie I-3. Salagon). Il y a donc un autre facteur à prendre en compte pour les prises de vue éloignées : l'angle d'intersection des sommets de prise de vue.

2. Lien entre angle d'intersection et pourcentage de points de liaisons utilisés

Un des problèmes en photogrammétrie éloignée est qu'un même détail de l'objet observé sous deux points de vue consécutifs différents formera un angle δ d'intersection trop petit pour une bonne définition. En effet, les reconstructions 3D sont calculées dans MicMac à partir des points de liaison exploitables entre les images. Donc, dans le cas d'une prise de vue éloignée, les points de liaison seront effectivement formés, mais ils ne seront pas exploitables entre les images car la zone d'incertitude sur la position d'un détail P dans le nuage de point sera trop importante à cause d'un angle δ trop faible.



Différence entre les angles d'intersection de sommets de prise de vue

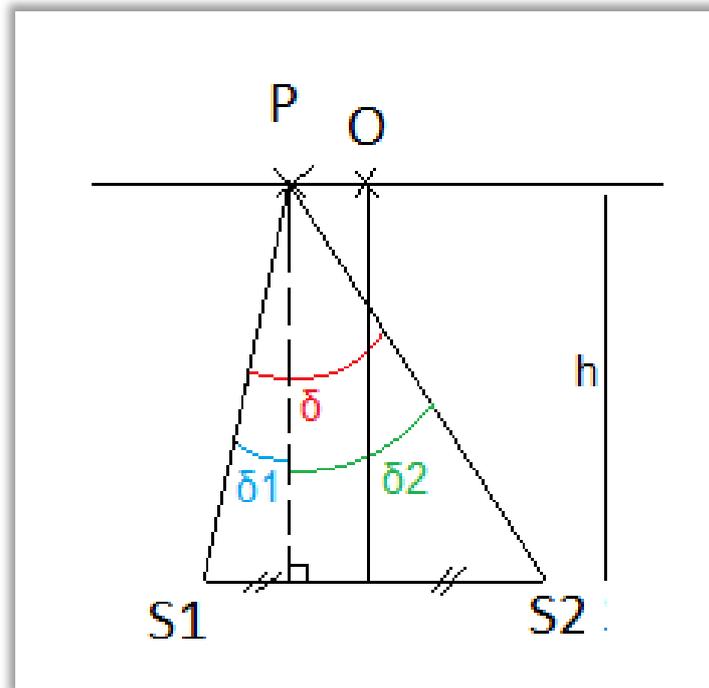
Ainsi, à partir d'une certaine distance h entre la base stéréoscopique et l'objet photographié, la reconstruction 3D ne s'opère plus même si l'emprise des images est la même car δ_2 devient trop faible. Il faut donc déterminer à partir de quelle distance l'angle δ ne permet plus de reconstruction.

Nous avons donc tenté de trouver une corrélation entre étroitesse de l'angle δ , recouvrement et pourcentage de points de liaison utilisés par MicMac. Une telle corrélation viendrait confirmer l'hypothèse précédente que certaines prises de vue lointaines n'ont pas pu être reconstruites à cause d'incertitudes sur la position des points des images, liées à l'intersection δ .

A partir de l'expérience menée à la Chapelle de Pierrerie et des différentes exploitations en fonction de la taille de la base entre deux sommets de prise de vue consécutifs (cf. Partie I-5.b), on trouve que l'angle δ suit la loi suivante :

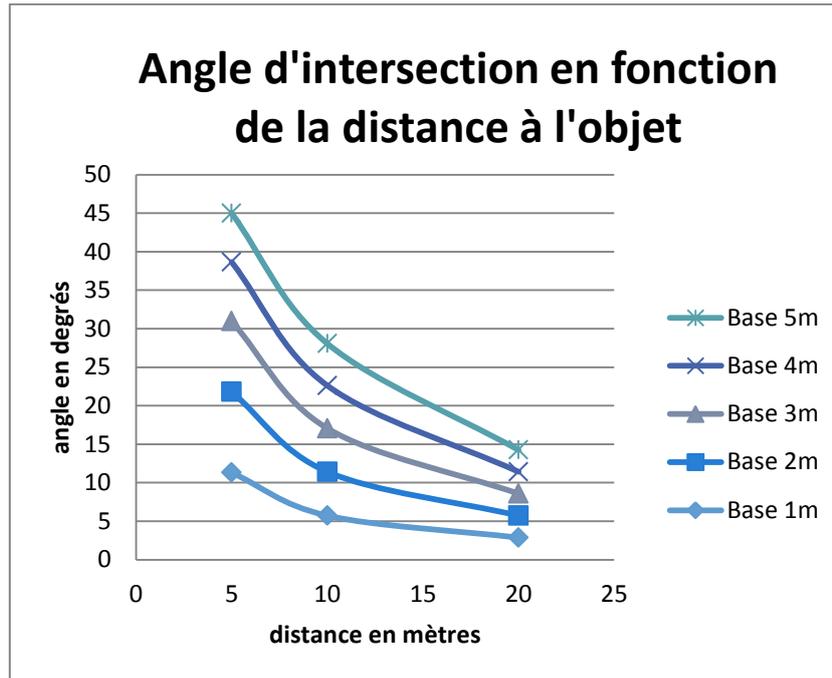
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{B}{2} - x}{h}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{\frac{B}{2} + x}{h}\right)$$

Avec δ l'angle d'intersection, $B = S_1S_2$ la base entre les deux sommets de prise de vue et $x = OP$ la distance entre O , le projeté du centre de la base sur l'objet, et le point P , déterminé par trigonométrie.



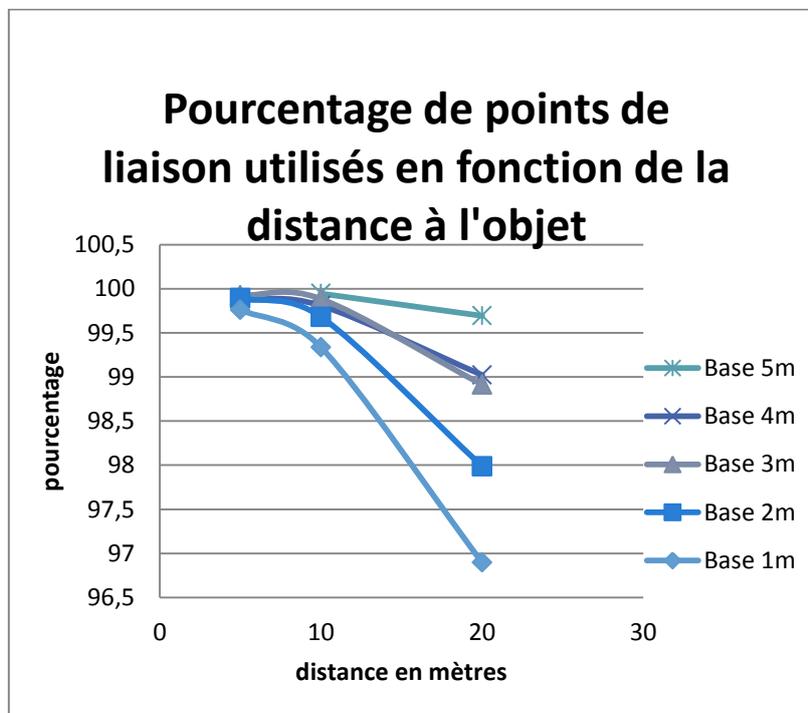
Intersection entre deux prises de vue consécutives

On établit alors le diagramme suivant montrant l'évolution de δ en fonction de la distance à l'objet.



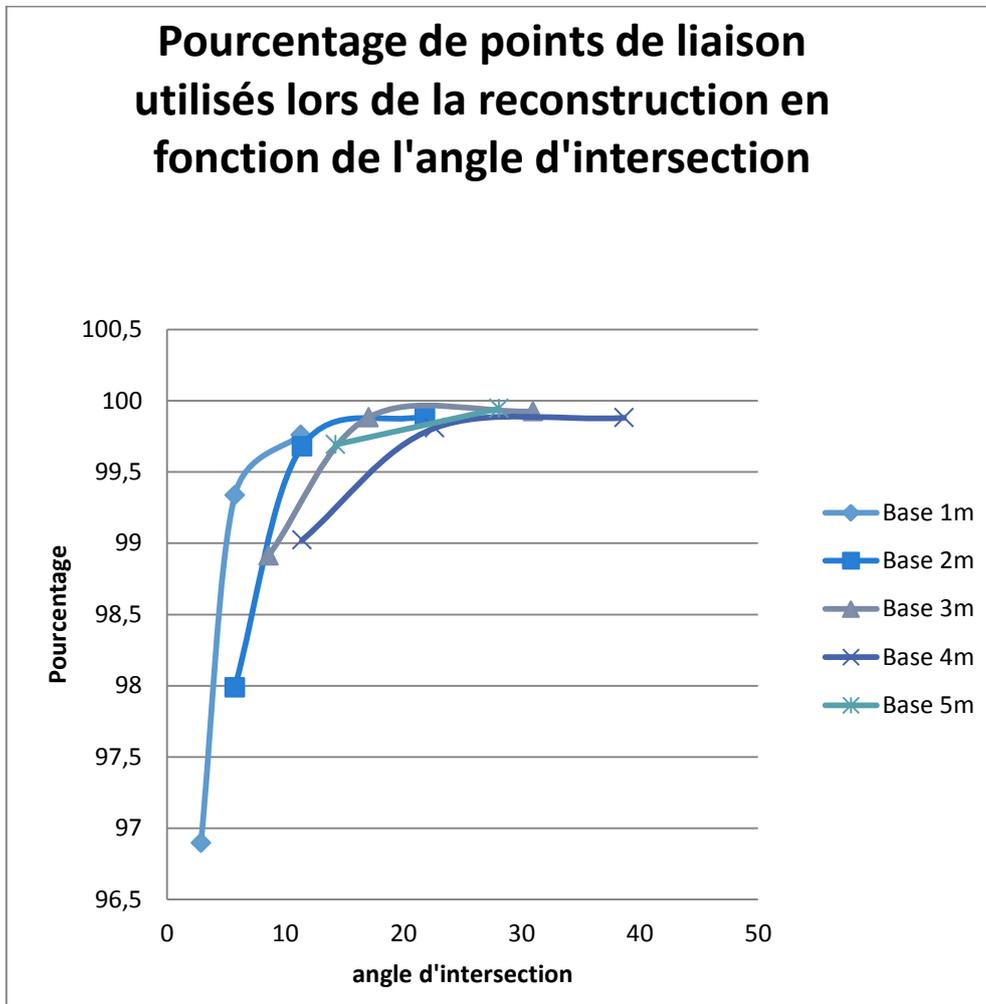
Quant au recouvrement il suit la loi suivante : $R = L - B$ avec R le recouvrement, L la longueur de l'image, $B = S_1 S_2$ la base stéréoscopique entre les deux sommets de prise de vue.

On peut alors étudier ces modèles à l'aide d'un tableur *Excel* en calculant et en traçant les courbes de variation du recouvrement, du nombre de points de liaisons trouvés en fonction de la distance et de leur utilisation dans la reconstruction 3D.



Ainsi, cette expérience nous permet de trouver un lien entre le pourcentage de points de liaison utilisés lors de la reconstruction et l'angle d'incidence δ . Ceci témoigne d'une corrélation

entre ces deux derniers comme prévu initialement. On en déduit alors une loi et son graphique suivant l'évolution du pourcentage de points de liaison en fonction de l'angle d'intersection. On observe que plus ce dernier augmente, plus les points de liaisons vont être utilisés, et mieux l'image sera reconstruite. De même, plus les bases séparant les stations sont grandes, plus les points de liaison seront utilisés lors de la reconstruction.



Ainsi, pour avoir la meilleure reconstruction 3D possible, une première idée serait d'augmenter la distance entre les bases lors des prises de vue lointaines. Néanmoins, agir ainsi diminue le recouvrement entre les photographies. On peut alors choisir de compenser en augmentant l'emprise sur l'objet, par exemple en gardant une petite focale. Cette idée fut testée dans notre expérience au Prieuré de Salagon, où le même problème que celui décrit au paragraphe précédent se pose : une faible focale avec de grandes bases ne permet pas de trouver assez de points de liaison dans l'arrière-plan. Il faut donc adapter la focale, l'écartement entre les sommets de prise de vue et le recouvrement voulu à la configuration topographique du chantier. Autrement, un autre protocole palliant à ce problème a été mis en place : le « balayage ».

3. Balayage

Le protocole photogrammétrique produit pour pallier les limitations étudiées ci-dessus consiste en un « balayage » de l'objet à reconstruire. Il fut mis en œuvre à deux reprises et a donné les meilleurs résultats obtenus jusqu'ici. Une première fois pour des prises de vue de distance faibles et moyennes (5, 10 et 20 mètres) à la chapelle de Pierrerie, et une seconde fois aux Pénitents des Mées pour des distances importantes (400 mètres).

La méthode du balayage consiste à multiplier les acquisitions en prenant une zone en photo pour chacune des stations d'observation. Ainsi, on peut alors obtenir des angles d'intersection importants sur un point de détail tout en conservant des bases permettant un recouvrement optimal. En effet, les détails sont vus non plus seulement sur des stations consécutives, mais sur des stations plus éloignées, et donc présentant un angle d'intersection plus important.

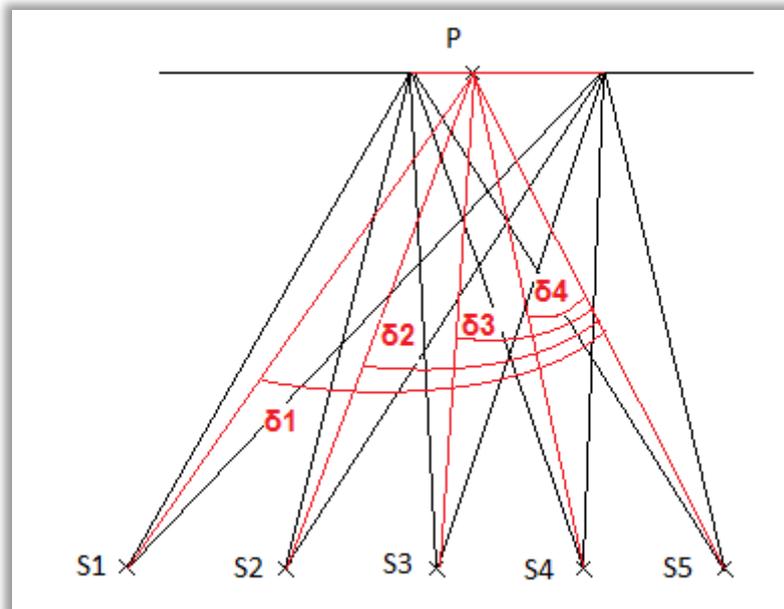


Schéma illustratif du balayage

Du fait de l'augmentation de l'angle d'intersection des sommets de prise de vue, cette méthode est la plus adaptée aux prises de vue lointaines. En effet, à 400 mètres, elle a permis la reconstruction en modèle 3D de trois prises de vue à différentes focales. Elle nécessite néanmoins beaucoup plus de temps que les autres méthodes photogrammétriques dans la prise de vue, par la multiplication des photos, et par conséquent les traitements aussi.

III. Influence de la réfraction atmosphérique

La réfraction atmosphérique est une problématique qui apparaît lors des prises de vue lointaines. Ce phénomène optique consiste en une courbure de la trajectoire du rayon lumineux entre le point observé et l'observateur. Le modèle le plus fréquent est celui d'un arc de cercle vertical dont le rayon vaut k fois le rayon terrestre (avec k compris entre 6 et 9) et qui conduit à voir l'objet plus haut ou plus bas qu'il ne l'est réellement. L'angle entre les deux directions, réelle et perçue depuis le point d'observation, est noté i par la suite. C'est par celui-ci que nous observons ce phénomène. Il est possible de construire un modèle de réfraction dans le plan vertical, mais ce modèle a ses limites puisqu'il nécessite de trouver à quelle distance l'objet étudié doit être placé afin d'observer la réfraction. De plus, il faut trouver un moyen photogrammétrique adapté à celui-ci. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence la difficulté à estimer le phénomène de réfraction avec une étude photogrammétrique à petite échelle.

1. Protocole photogrammétrique avec nuage de points

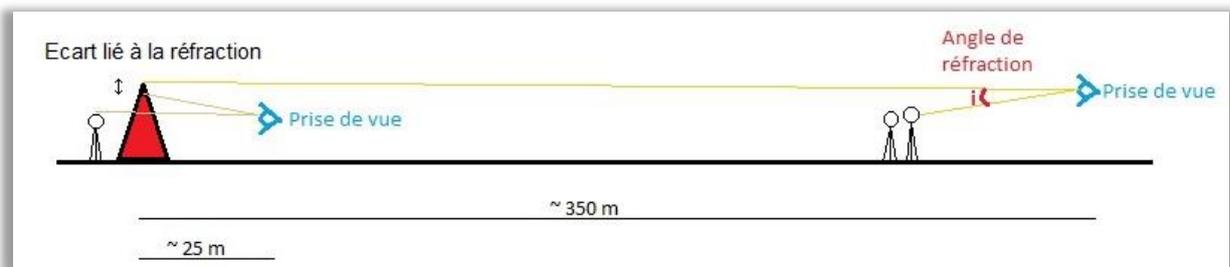


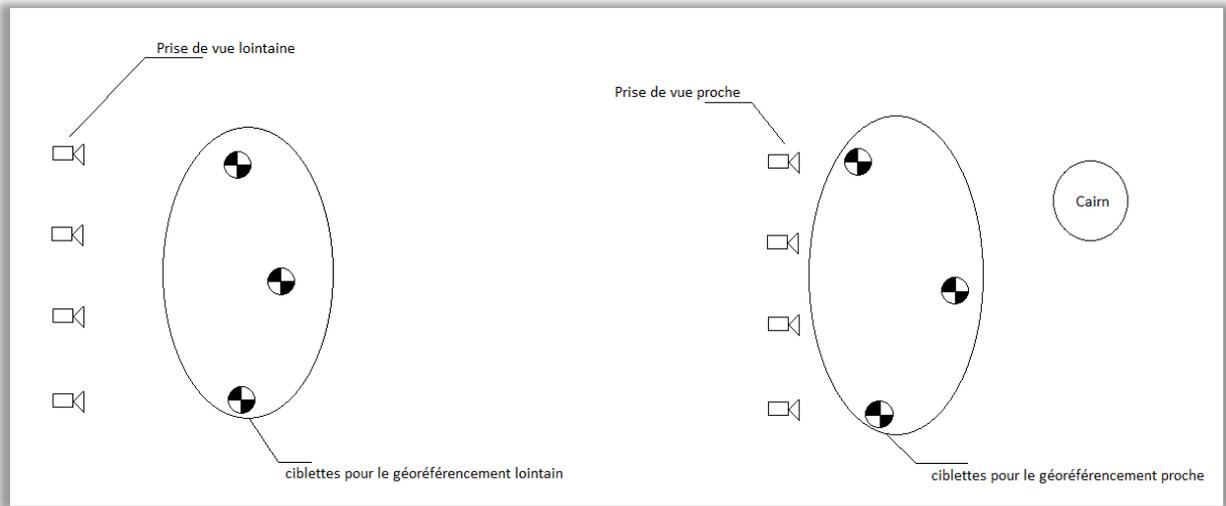
Schéma de détermination de la réfraction à la montagne de Lure

La première idée a été de superposer deux nuages de points (prises de vue proches et lointaines) géoréférencés. Le principe était de mettre en évidence le décalage lié à la réfraction entre les nuages de points. Le protocole, mis en place au sommet de la montagne de Lure sur un cairn, était le suivant :

- Mise en place de cibles Black&White pour géoréférencer les prises de vue, en plus de points naturels. Ces points ont été levés par GNSS *Trimble R8* et des mesures topométriques ont été faites avec un tachéomètre *Leica TS06 Plus* sur les points naturels.
- Référencement des nuages de points des deux prises de vue
 - Points de géoréférencement DL : les B&W au premier plan de la prise de vue, un repère au sol proche du cairn et un point naturel près de la barrière.
 - Points de géoréférencement DP : le repère au sol près du cairn et les points naturels sur le cairn, eux-mêmes géoréférencés par topométrie avec le repère au sol et le point naturel proche de la barrière en référence.
- Sur le nuage de points de la prise de vue DL, on peut pointer le GNSS à côté du cairn et comparer les coordonnées photogrammétriques avec les coordonnées réelles obtenues par un stationnement GNSS.

Ce premier test n'a pas porté ses fruits puisque nos outils et notre protocole n'étaient pas encore au point pour former des nuages de points à longue distance. De plus, les modèles théoriques mis en

place par la suite ont montré que la distance au cairn était beaucoup trop faible pour voir apparaître le phénomène de réfraction.



Proposition d'un chantier de calcul de la réfraction sur la Montagne de Lure

2. Protocole photogrammétrique avec une image

Le protocole photogrammétrique de nuages de points n'étant pas concluant, il est venu l'idée d'analyser une seule image qui contient un objet « proche » (environ 1km) et un objet « lointain » (de l'ordre de la dizaine de kilomètres). Il s'agit des distances optimales obtenues par le modèle.

La première étape est de calculer la distance D entre l'appareil photo et les deux objets grâce à leurs coordonnées GPS. En prenant arbitrairement $k = 7$, on obtient l'angle de réfraction i suivant la formule (inspirée des modèles simplistes les plus courants sur la réfraction) :

$$i = \frac{D}{2kR_t} \text{ avec } \begin{cases} D \text{ la distance entre l'objet éloigné et l'appareil} \\ R_t \text{ le rayon terrestre} \\ k \in \llbracket 6,9 \rrbracket \end{cases}$$

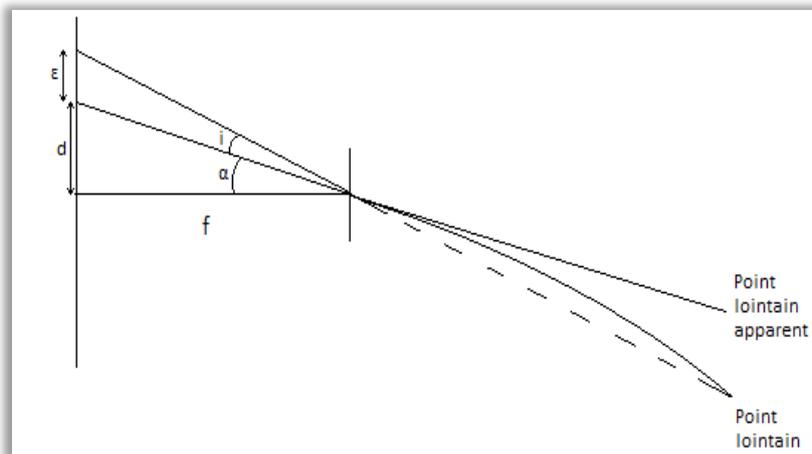


Schéma du modèle de la réfraction

En outre, on peut estimer (en pixels ou mm) la distance d entre le PPA et l'objet sur la photo. La focale et ces deux paramètres permettent de calculer ε qui représente l'impact de la réfraction sur l'image grâce à :

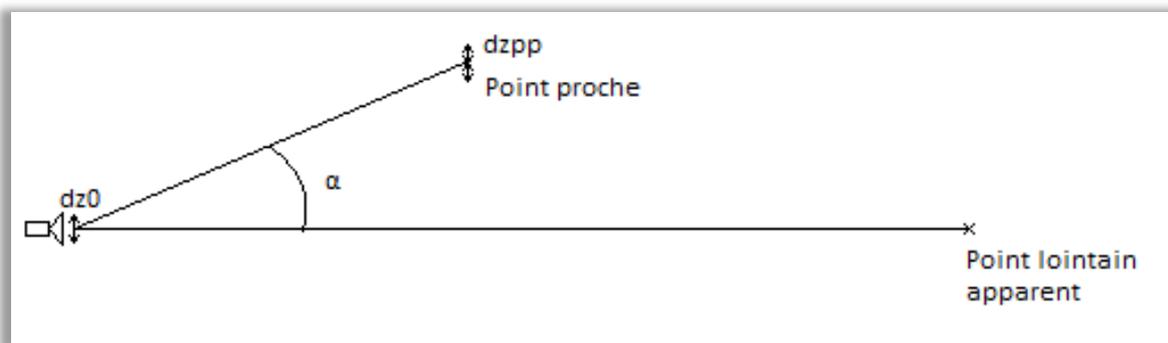
$$\varepsilon = \left(1 + \frac{d^2}{f^2}\right) * f * i$$

En combinant les deux modèles précédents on obtient donc la prédiction du décalage dans l'image engendré par la réfraction pour un détail situé dans le monde à une distance D de l'appareil photo :

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{d^2}{f^2}\right) * f * \frac{D}{2kR_t}$$

Les applications numériques de cette formule laissent apparaître l'une des difficultés : les décalages prévisibles sont de l'ordre de quelques pixels. Il faut donc mettre au point un protocole qui accroisse ce décalage, et maîtriser les facteurs qui peuvent aussi induire des décalages de quelques pixels dans l'image (distorsion, détermination fine des altitudes du point proche et de l'appareil photo...).

La marge d'erreur dans les coordonnées de l'appareil photographique et du point proche est calculée à partir du schéma suivant :



On obtient le système :

$$\begin{cases} d\alpha = \frac{-dZ_0}{X_{pp} - X_0} * \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_{pp} - Z_0}{X_{pp} - X_0}\right)} \\ d\alpha = \frac{dZ_p}{X_{pp} - X_0} * \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_{pp} - Z_0}{X_{pp} - X_0}\right)} \end{cases}$$

Ce qui permet de déterminer l'erreur maximale de 1 cm pour dZ_0 et dZ_p avec $d\alpha < 0.00005$ gons pour une distance de 900 mètres au point proche. Avec X_{pp} , X_0 , Z_{pp} et Z_0 les coordonnées de l'appareil photo et du point proche, dZ_p et dZ_0 les marges d'erreur sur le positionnement vertical du point proche et de l'appareil photo, respectivement.

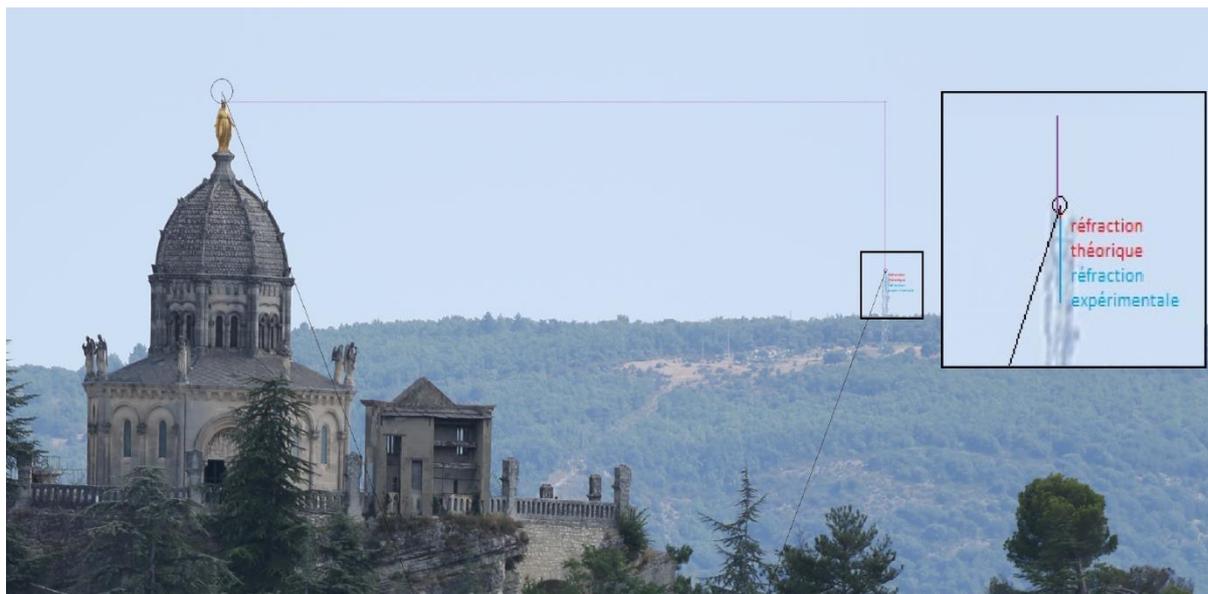
La calibration de l'appareil photo étant aussi à prendre en compte, on comprend alors que les méthodes photogrammétriques, pour mettre en évidence la réfraction, nécessitent une grande précision dans les manipulations, notamment dans le pointage et dans l'obtention des coordonnées des points étudiés.

Ceci va être confirmé lors d'une expérience mis en œuvre entre le collège Henri Laugier de Forcalquier, la citadelle de Forcalquier et une antenne à 9.5 kilomètres de Forcalquier. On détermine dans un premier temps les coordonnées (Est, Nord et altimétriques) de chacun de ces points grâce à des mesures GPS pour les points accessibles, ou des fiches de coordonnées et des mesures au tachéomètre vis-à-vis d'une référence pour le sommet de l'antenne ou de la citadelle qui sont, eux, moins accessibles. Ces coordonnées permettent de calculer l'angle α entre l'antenne et le sommet de la citadelle puis la distance en pixel qui devrait séparer ces deux sommets sur la photo prise au collège de Forcalquier sans tenir compte de la réfraction. Pour cette dernière, on trouve 6 pixels soit 0.9 mètres en réalité.

Cette même distance doit être mesurée en pixels sur la photo. On obtient alors la distance apparente (dans laquelle la réfraction est prise en compte). On réalise alors que ces deux distances sensées être identiques ne le sont pas : en théorie ceci est dû uniquement à la réfraction et la soustraction des deux distances devrait donner environ ε (la correction liée à la réfraction sur l'image) égal à 6 pixels. Cependant ce n'est pas le cas dans nos calculs, on trouve environ 70 pixels.

Une deuxième série de mesures est effectuée en prenant en compte la distorsion de l'image. On trouve cette dernière à partir des coefficients de distorsion données dans les fichiers de calculs de MicMac. On corrige alors le point du sommet de l'antenne et de la citadelle, sur la photographie, de leur distorsion respective, ce qui permet de recalculer alors l'impact de la réfraction sur l'image. On trouve alors $\varepsilon = 50$ pixels, ce qui reste très supérieur aux 6 pixels établis théoriquement.

A partir de ces 50 pixels, on peut alors calculer le coefficient de réfraction k que notre modèle devrait avoir pour obtenir un tel résultat. On trouve une valeur aux alentours de 1. Ce résultat paraît très peu réaliste et correspond à une réfraction de 7.5 mètres sur le sommet de l'antenne, ce qui est improbable. Ceci prouve donc que l'erreur entraînant la différence entre l'impact de la réfraction théorique et expérimentale se situe du côté de l'expérience et non du modèle. En effet, comme il a été établi plus tôt, le positionnement en coordonnées des 3 points de notre système (citadelle, antenne, appareil photo) doit être centimétrique pour que l'erreur soit négligeable. Nous pensons ici qu'une telle précision n'a pas pu être atteinte.



Ce résultat montre à nouveau la difficulté de parvenir à une mesure de la réfraction cohérente avec des méthodes photogrammétriques. Ceci est lié à l'accumulation des erreurs lors du pointage et des erreurs sur les coordonnées des points ainsi qu'aux approximations de notre modèle.

Conclusion

Ce projet a permis d'apprécier les difficultés que l'on peut rencontrer dans le domaine de la photogrammétrie terrestre en particulier pour les prises de vue lointaines et à focale variable. Plus encore, ces semaines de stage nous ont offert la chance d'effectuer un véritable travail de recherche et d'expérimentation en groupe, aussi bien pour établir un protocole optimal d'acquisition et de traitement des prises de vue éloignées, que pour évaluer la réfraction dans l'atmosphère. C'est aussi au cours de cette dernière partie que nous avons pu observer les limites des techniques photogrammétriques qui ne sont pas les plus adaptées à de telles mesures.

Utilisation*	Reconstruction successive	Balayage
DP	√	√
DP et DL	√	√
DL		√

**sous contrôle de la variation de la base et de l'angle d'intersection*

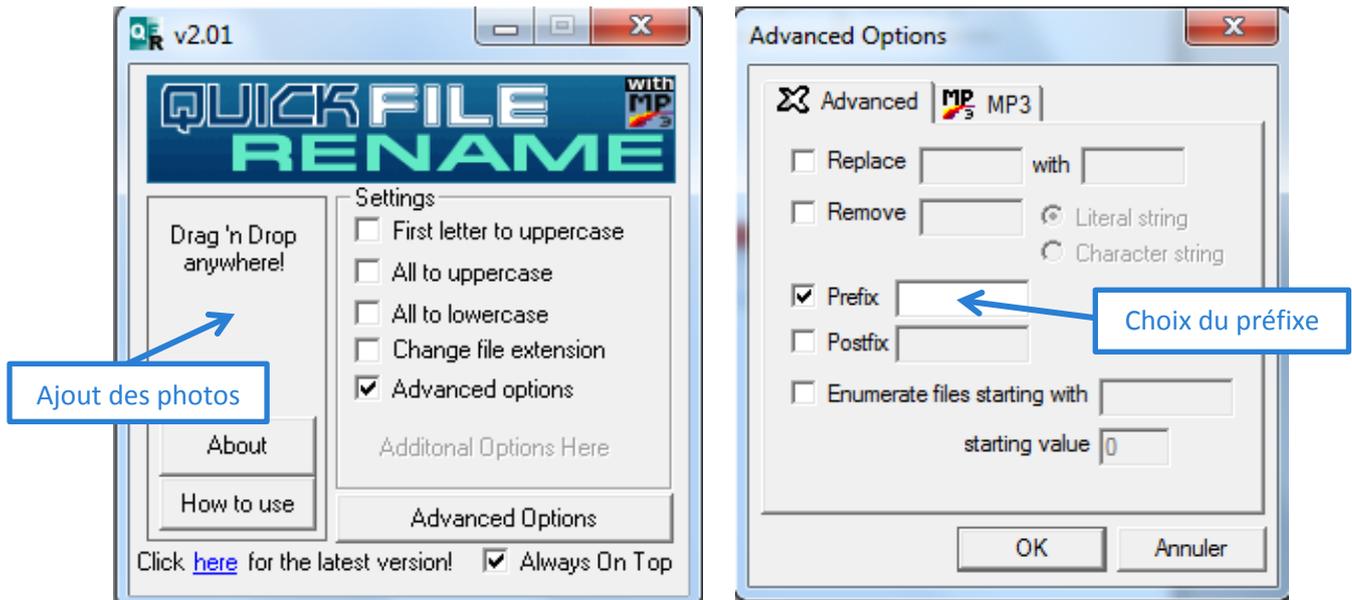
Nous remercions le corps enseignant de nous avoir aidés à de nombreuses reprises au cours de notre stage, et en particulier notre maître de stage, Jean-François Hangouët.

Annexe

Logiciel de renommage

Le logiciel *QuickFileRename* est un logiciel libre permettant le renommage de fichiers en grande quantité en quelques manipulations très simples.

Dans le cadre de notre projet, nous avons ajouté des préfixes aux noms des photos pour mieux repérer la distance et/ou la focale de travail et facilité le travail sur MicMac.



Une fois les photos glissées, elles sont automatiquement renommées dans le fichier source selon les paramètres choisis dans le logiciel.

Commandes MicMac

Le logiciel MicMac permet de reconstruire un objet à partir de prises de vue photographiques. Les étapes jusqu'à la reconstruction 3D sont nombreuses et peuvent varier en fonction des paramètres en entrée. Toutes les commandes doivent être entrées dans le dossier des photos avec un interpréteur de commandes et commencent par « mm3d » qui permet d'appeler le logiciel MicMac.

Exemple des commandes pour la prise de vue de près avec la focale 200mm aux Mourres.

```
mm3d Tapioca All ".*JPG" 2000
mm3d Tapas AutoCal "DP_(100|200).*JPG" InCal=DP_100 Out=DP_200
mm3d Apericloud "DP_200_.*JPG" DP_200
mm3d Tapas RadialStd "DP_200_.*JPG" InOri=DP_200 Out=DP_200b
mm3d Apericloud "DP_200.*JPG" DP_200b
mm3d SaisieMasqQt Apericloud_DP_200b.ply
mm3d C3DC MicMac "DP_200_.*JPG" DP_200b Masq3D=Apericloud_DP_200b.ply Out=C3DC_DP_200b.ply
```

a. Tapioca

Cette commande permet de rechercher les points de liaisons entre toutes les images.

Paramètres :

- "All", qui permet de tester toutes les images entres elles
- "exemple.*format", qui permet de sélectionner toutes les images (avec *) commençant par « exemple », avec le bon format des images
- "Int", qui correspond à la taille de l'image.

Commande classique : `mm3d Tapioca All "exemple.*format" Int`

Exemple : `mm3d Tapioca All ".*JPG" 2000`

b. Tapas

Cette commande permet de réaliser l'orientation relative du bloc, c'est-à-dire calculer la position de tous les sommets de prise de vue et leurs matrices rotation, dans un repère relatif.

Paramètres :

- "AutoCal", qui permet d'utiliser une calibration de l'appareil photo déjà calculée
- "exemple.*format", qui permet de sélectionner toutes les images (avec *) commençant par « exemple », avec le bon format des images
- "InCal=nom_calibration", qui permet de charger la calibration calculé
- "RadialStd", pour avoir une calibration standard de l'appareil photo
- "Out= bloc_sortie_Tapas", qui permet de nommer l'orientation relative du bloc pour faciliter le traitement.

Commandes classiques:

- `mm3d Tapas AutoCal "IMG.*JPG" InCal=Calib Out=Bloc`
- `mm3d Tapas RadialStd "IMG.*JPG" Out=Bloc`

Exemple :

- `mm3d Tapas AutoCal "DP_(100|200).*JPG" InCal=DP_100 Out=DP_200`
- `mm3d Tapas RadialStd "DP_200_.*JPG" InOri=DP_200 Out=DP_200b`

c. AperiCloud

Cette commande permet de réaliser la mise en place relative du bloc grâce à l'orientation relative du bloc calculée précédemment, ce qui permet de visualiser les points de liaison et voir la position des sommets de prises de vue.

Paramètres :

- "exemple.*format", qui permet de sélectionner toutes les images (avec *) commençant par « exemple », avec le bon format des images
- "Bloc_sortie_Tapas", le bloc d'orientation en sortie du Tapas
- "Out=mep_sortie_AperiCloud.ply", qui permet de nommer le fichier de mise en place du bloc

On peut alors ouvrir le fichier « .ply » général avec le logiciel CloudCompare et contrôler que tout c'est bien passé, qu'il n'y a pas de trou dans le bloc ou que les photos ne soient pas mal positionnées.

Commande classique : `mm3d Apericloud "IMG.*JPG" Bloc Out=Bloc_mep.ply`

Exemple : `mm3d Apericloud "DP_200.*JPG" DP_200b`

d. SaisieMasqQT

Il est possible de saisir un masque dans le nuage de point de la mise en place si on veut reconstruire juste une partie de la mise en place ou enlever les points parasites. Cette commande ouvre une interface de saisie.

Paramètre :

- `"mep_sortie_AperiCloud"`, le fichier « .ply » de mise en place du bloc

Exemple : `mm3d SaisieMasqQt Apericloud_DP_200b.ply`

e. C3DC

Cette commande permet de lancer la reconstruction 3D du bloc par corrélation dense.

Paramètres :

- Il existe plusieurs possibilités de reconstruction, plus la qualité de reconstruction est importante plus les temps de calcul sont long :
 - `QuickMac`, basse densité
 - `MicMac`, densité moyenne
 - `BigMac`, haute densité
 - `Forest`, permet d'avoir une reconstruction plus importante mais avec un score de corrélation plus faible.
- `"exemple.*format"`, qui permet de sélectionner toutes les images (avec *) commençant par « exemple », avec le bon format des images
- `"mep_sortie_AperiCloud"`, le fichier « .ply » de mise en place du bloc
- `"Masq3D=mep_sortie_AperiCloud_Masq.ply"`, qui permet d'aller chercher les informations correspondant au masque saisi précédemment et de limiter la reconstruction à la zone saisie
- `"Out= bloc _GCPBascule_fin_C3DC"`, qui permet de nommer le fichier « .ply » de reconstruction 3D du bloc.

Commande classique : `mm3d C3DC MicMac ".*JPG" Bloc_BasculeFin`

`Masq3D=Bloc_BasculeFin_Masq_mep.ply Out=Bloc_BasculeFin_Masq_C3DC_MicMac.ply`

Exemple : `mm3d C3DC MicMac "DP_200.*JPG" DP_200b Masq3D=AperiCloud_DP_200b.ply
Out=C3DC_DP_200b.ply`