

Stage de 1<sup>ère</sup> année

**Projet de photogrammétrie**

**Incrustation photogrammétrique**

P. Bodin, M. Gaudin, A. Gonnaud, G. Fonteix  
École Nationale des Sciences Géographiques  
Juillet-Août 2017



ÉCOLE NATIONALE  
DES SCIENCES  
GÉOGRAPHIQUES

# Table des matières

Introduction.....	4
1 Incrustation d'un objet non issu d'une prise de vue photogrammétrique.....	6
1.1 Incrustation d'objets par torsion d'image.....	7
1.2 Incrustation d'objets dans une image par calculs de coordonnées.....	10
1.1.1. Description et méthodologie.....	10
1.1.2. Expérimentations.....	12
Test 1 : Pixels colorisés.....	12
Test 2 : Vignette de pixels texturée.....	15
Test 3 : Sphère texturée.....	18
1.1.3 Synthèse.....	21
1.3 Protocole et recommandations.....	23
Comment incruster un objet non issu d'une prise de vue photogrammétrique dans une scène ?.....	23
Contraintes.....	24
2 Incrustation d'un objet issu d'une prise de vue photogrammétrique.....	25
2.1 Incrustation dans le même décor.....	27
Test 1 : prise de vue circulaire en extérieur.....	27
Test 2 : prise de vue circulaire en intérieur.....	30
Test 3 : prise de vue circulaire avec la nouvelle méthode.....	32
2.2 Incrustation dans un autre décor.....	34
Test 1 : prise de vue parallèle.....	34
Test 2 : prise de vue rectangulaire.....	35
Test 3 : prise de vue circulaire.....	39
2.3 Incrustation dans un autre décor en extérieur.....	40
Tests 1 et 2 : prises de vues parallèles.....	40
Test 3 : prise de vue circulaire.....	42

2.4	Protocole.....	43
	Comment incruster un objet issu d'une prise de vue photogrammétrique dans un nouveau décor ? .....	43
	Limites.....	44
2.5	Piste de méthode alternative : par torsion des images de la seconde prise de vue	45
3	Suppression d'un objet dans une scène .....	47
3.1	Description.....	47
3.2	Expérimentations .....	49
	Modes opératoires.....	49
	Test 1 : Correcteur Photoshop®.....	49
	Test 2 : Morceaux de mur différents .....	52
	Test 3 : Même morceau sur chaque image .....	55
	Test 4 : Même morceau bien placé.....	57
	Test 5 : Quatre coins bien placés .....	59
	Test 6 : Quatre coins bien placés et bords estompés.....	61
	Test 7 : Quatre coins bien placés sans calcul .....	64
	Résultats .....	66
3.3	Protocole et recommandations.....	69
	Comment supprimer un objet présent dans une scène 3D ? .....	69
	Contraintes.....	70
4	Tolérance de MicMac .....	72
4.1	Etude de la translation .....	72
	Translation constante.....	72
	Translations multiples.....	73
	Commentaires .....	73
4.2	Etude de la rotation.....	74
	Rotation constante.....	74
	Rotations multiples .....	75

4.3	Synthèse .....	77
4.4	Etude de petits mouvements de l'appareil photo.....	78
	Description .....	78
	Commentaires .....	79
5	Matériel utilisé .....	81
5.1	Description.....	81
	Usage.....	81
	Aspect .....	81
	Matériau.....	82
5.2	Mode opératoire.....	83
	Positionnement du rail par rapport à l'objet .....	83
	Déroulement d'une prise de vue.....	85
5.3	Qualification des prototypes .....	86
	Avantages.....	86
	Contraintes et inconvénients.....	86
	Limites.....	87
	Améliorations .....	87
	Conclusion .....	89
	Remerciements.....	90
ANNEXES		
	ANNEXE 1 : Script Python	
	ANNEXE 2 : Tutoriel Photoshop®	
	ANNEXE 3 : Cahier des charges fonctionnel pour un dispositif d'acquisition photogrammétrique avec incrustation d'objets	

# Introduction

On propose ici une étude de méthodes d'incrustation et suppression d'objets dans une scène.

Il s'agit de modifier le contenu de chacune des images d'une prise de vue photogrammétrique terrestre pour faire apparaître, à l'issue de la reconstitution 3D, un objet étranger à la scène photographiée.

Nous réaliserons une acquisition photogrammétrique d'une scène, et en déduirons (via MicMac) les positions géométriques relatives des images.

Nous incrustons alors l'image de l'objet dans chacune des images de la scène. A partir de ces images modifiées, nous établirons le modèle 3D de la scène, et nous analyserons le résultat.

Nous étudierons deux grandes méthodes d'ajout, sujets respectifs des deux premières parties de ce rapport.

La première consiste à intégrer dans chacune des images de la prise de vue un détail qui n'a pas été l'objet d'une prise de vue photogrammétrique, dessiné à la main, ou extrait d'une image (motif...). La reconstruction 3D repose sur le fait que l'objet doit être placé exactement « au bon endroit » dans chaque vue (c'est-à-dire : de manière à créer des points homologues). L'enjeu est de créer un objet géométriquement cohérent, dans la perspective des images de la scène.

Dans la seconde méthode, l'objet est issu d'une prise de vue photogrammétrique dédiée. Nous simulons des vues semblables à celles de la scène sur l'objet étranger à incruster. Nous ajoutons ensuite chaque portion de l'objet vu à chaque photo de la scène. Ici la reconstruction 3D s'appuie sur le respect de la perspective. Tout l'enjeu est de reproduire une prise de vue à l'identique.

Dans une troisième partie, nous étendrons les méthodes testées à la suppression d'objets.

Nous nous heurterons tout au long de nos expériences à un problème de précision, les objets à incruster devant être artificiellement placés en s'approchant suffisamment de la perspective imposée par la scène (position dans l'image, angle de vue). Un placement trop éloigné de la position idéale réaliste ne permet pas la création du modèle 3D. Nous étudierons donc dans une quatrième partie la tolérance du logiciel MicMac quant aux écarts de

positionnement des objets dans des images, lorsque l'on cherche à créer un modèle 3D à partir de ces photomontages.

Nous détaillerons enfin dans une cinquième partie le matériel utile pour faciliter les acquisitions photos, compte tenu des exigences de précision dégagées. Il s'agit de dispositifs construits et utilisés au cours du projet ; nous proposons également une version améliorée des dispositifs, mais hors des moyens accordés à ce projet.

# 1 Incrustation d'un objet non issu d'une prise de vue photogrammétrique

Dans un premier temps, on teste la possibilité d'incruster manuellement une image dans le modèle 3D : il ne s'agit pas là d'incruster une photographie en perspective dans chacune des images d'un fond de même perspective, ce qui sera une deuxième méthode explorée par la suite, mais bien de dessiner un détail ou ajouter un motif unique directement sur les images, dans l'objectif qu'il soit reconstruit par MicMac dans le modèle 3D.

On souhaite incruster un objet dans une scène, en ajoutant l'image de l'objet à chacune des vues de la scène. Le bon positionnement de l'objet à rajouter est donc clé : l'objet doit apparaître dans chacune des vues, et au bon endroit de l'image, pour être reconstruit dans le modèle 3D.

L'enjeu de cette première grande méthode d'ajout est de déterminer des positions cohérentes (points homologues) et d'y placer l'image de l'objet à incruster.

Une première méthode, qui n'a recours à aucun calcul, consiste à directement placer l'objet à incruster en déformant son image pour qu'elle coïncide avec les mêmes détails repérables du décor dans chaque vue, de sorte qu'une perspective est artificiellement recrée.

Une seconde méthode propose de passer par la détermination des coordonnées de points homologues, à partir de la formule d'image. On ajoute alors l'objet sur des points homologues.

## 1.1 Incrustation d'objets par torsion d'image

Cette première méthode consiste à amener, dans chaque vue, les mêmes points de l'image à incruster sur les mêmes points des images de la scène.

Dans notre expérience, nous choisissons d'ajouter un plan de carrelage dans un coin de mur carrelé.

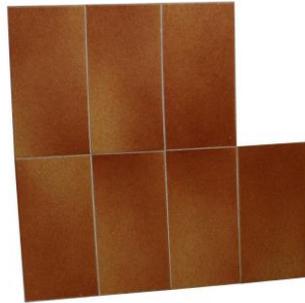


FIGURE I.1 : Plan de carrelage incrusté dans la scène

Le carrelage présente l'avantage d'offrir des points repérables : les coins des carreaux.

Il s'agit ensuite de déformer la plaque de carrelage à ajouter pour faire coïncider les coins de la plaque avec toujours les mêmes coins de carrelage du fond. Notons que la déformation n'est pas quelconque : elle doit en particulier conserver les lignes droites. Il s'agit de recréer la perspective, sans modifier la géométrie de l'objet. Nous utilisons pour cela l'outil *Torsion* de Photoshop®.



FIGURE I.2 : L'une des photos du décor, avant retouche



FIGURE I.3 : La même photo du décor, retouchée : le plan à incruster est placé.  
(Les coins du plan incrusté sont marqués en jaune pour plus de lisibilité)

Nous travaillons ici sur un jeu de cinq photos.

Le traitement MicMac reconnaît une importante quantité de points de liaison sur le plan ajouté. Le nuage de points obtenu après corrélation dense (*Malt* de MicMac) présente bien le plan, placé à l'endroit attendu ; la densité des points est normale, ils apparaissent dans le plan (pas de volume anormal) et la couleur est bonne.

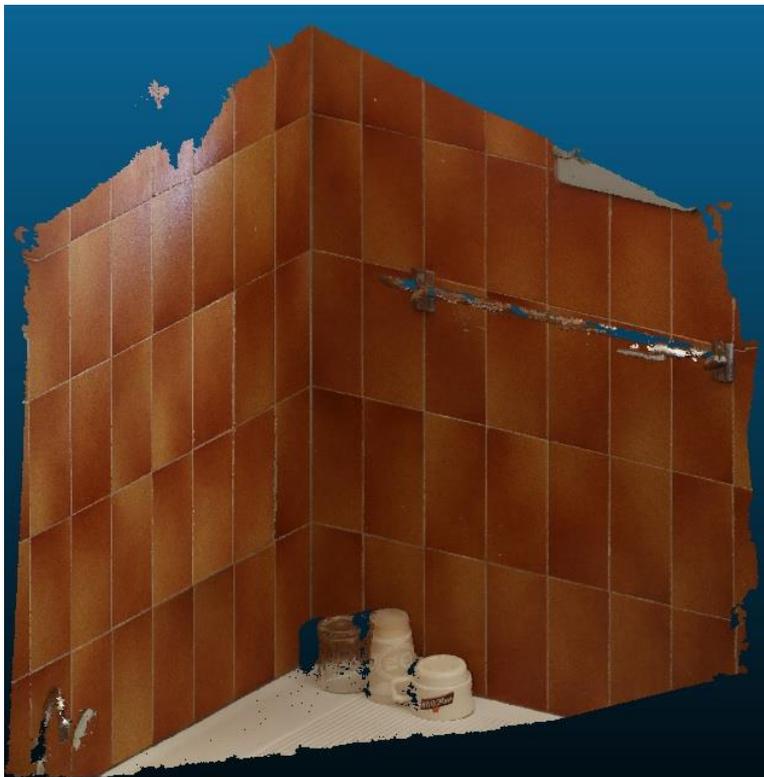


FIGURE I.4 : Reconstruction 3D de la scène sans retouche



FIGURE I.5 : Reconstruction 3D après incrustation du plan dans le coin

La reconstruction fonctionne donc bien : cette méthode est valide.

Notons que le décor se reconstitue moins proprement qu'avant montage. Avant incrustation, il y a en effet une plus grande surface disponible pour les calculs de corrélation du fond, surface masquée après incrustation par le plan ajouté. Il faudrait envisager plus de photos pour consolider la scène.

Si la méthode fonctionne bien, notons que son application est limitée.

Il faut en effet des points repérables sur le fond, précisément à l'endroit où l'objet devra être ajouté. S'ils existent naturellement, cette méthode est adaptée et très rapide. Sinon, soit il est nécessaire d'anticiper et de placer des cibles avant la prise de vue de la scène, pour qu'elles apparaissent ensuite sur les images ; soit il faut les ajouter en post-traitement, ce qui nécessite de déterminer les coordonnées de points homologues dans les images, et nous ramène à la deuxième méthode (moins immédiate) explorée plus bas.

Notons enfin et surtout que cette méthode ne permet a priori que l'incrustation d'objets plans (mais de forme quelconque, pourvu que les repères soient placés de manière adéquate), puisqu'elle ne permet pas de faire apparaître des faces différant selon la perspective, mais seulement de déformer un plan unique selon l'angle de vue.

## 1.2 Incrustation d'objets dans une image par calculs de coordonnées

### 1.1.1. Description et méthodologie

On cherche à colorer des points qui deviendront homologues dans chacune des images d'une prise de vue d'un décor.

On réalise une prise de vue photogrammétrique d'un milieu texturé dont on réalise une reconstitution 3D. Cette première orientation dans un repère arbitraire que se fixe automatiquement MicMac nous donne les informations nécessaires pour appliquer, dans ce repère, les formules d'image qui nous permettront de déterminer les coordonnées image des points homologues à colorer.

Dans CloudCompare, on intuite les coordonnées terrain d'un point à partir du repère local créé par MicMac. On regarde pour cela les coordonnées de plusieurs points à proximité de notre point terrain (par exemple, de part et d'autre pour choisir la moyenne selon l'un des axes du repère), et on en déduit ses coordonnées.

On utilise la formule d'image pour passer du point terrain au point dans l'image. Devant la quantité de données à exploiter pour les calculs, pour gagner du temps, nous automatisons le processus en implémentant un script Python qui récupère dans les fichiers \*.xml les informations de la mise en place effectuée par MicMac (coordonnées du sommet de prise de vue, matrice de rotation de la prise de vue, calibration de l'appareil photo), et donne les coordonnées image du point terrain dans chacune des images de la prise de vue. Nous lançons l'algorithme pour chacun des points terrain.

Les détails de l'algorithme sont donnés en Annexe.

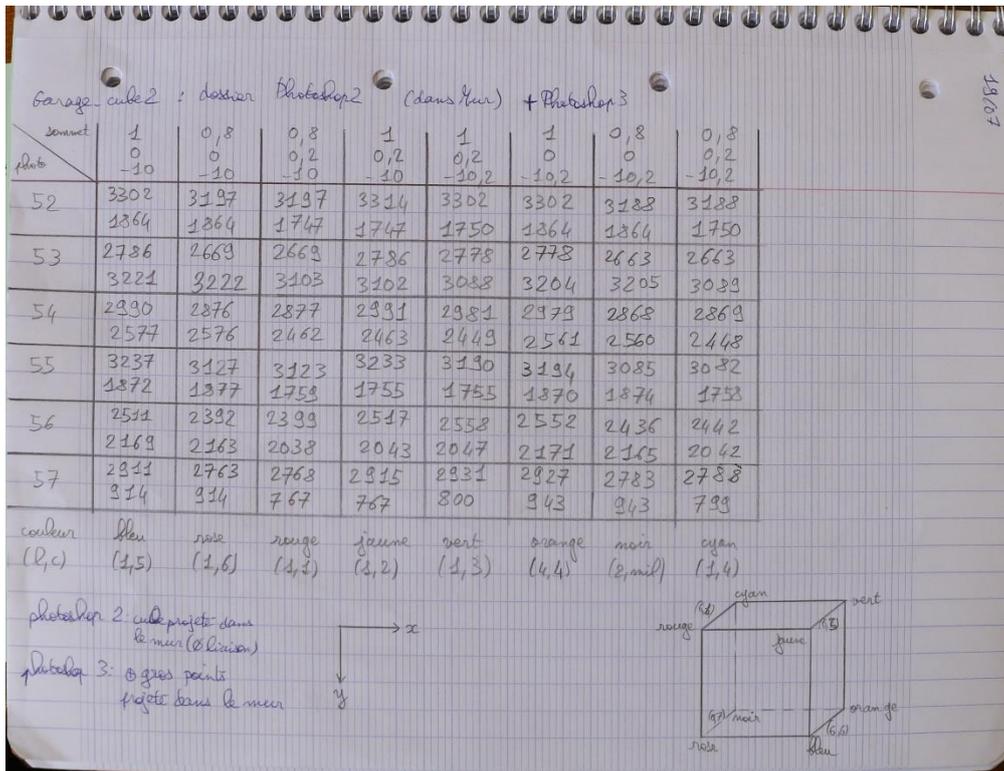


FIGURE I.6 : Tableau des coordonnées image de points terrains, calculées avec la formule d'image pour toutes les photographies de la prise de vue

Nous avons utilisé *Malt* pour les reconstructions 3D de cette partie. Sur un nombre restreint de photos (six ici), et avec une image maîtresse désignée, le rendu est en effet meilleur qu'avec C3DC (texture plus réaliste en particulier, et nuage de points plus complet).

## 1.1.2. Expérimentations

### Test 1 : Pixels colorisés

On cherche ici à incruster manuellement les coins d'un cube de couleur dans une prise de vue photogrammétrique.

L'objectif est d'observer les coins du cube de couleur dans le modèle 3D obtenu sous MicMac avec les photographies modifiées.

Le cube est attendu flottant devant le coin du mur, à mi-hauteur, environ à mi-distance entre le mur et le muret (visibles FIGURE I.7).

Dans cette première expérience, on colore des pixels homologues sur les images (les sommets de notre cube), dont on a calculé la position à partir des points terrain (cf. FIGURE I.6).

Pour cela, on choisit un premier point terrain, pour lequel on a trouvé des coordonnées terrain cohérentes grâce à la visualisation du nuage de points sur CloudCompare. On déduit de ces premières coordonnées des coordonnées terrain cohérentes pour les sept autres sommets.

#### a) Tache colorée ponctuelle

Nous essayons plusieurs dimensions pour la tache de couleur : 1 pixel, puis au vu des résultats, un carré 2x2 px.

**Résultat** : Les taches ne sont pas visibles dans les nuages de points (ni des points de liaison, ni après corrélation dense).

**Interprétation** : Pour des blocs de quelques pixels, MicMac ne détecte pas ces points comme étant homologues ; leur singularité les place au même rang que du bruit.

**Hypothèse** : La tache est petite (voire ponctuelle) et n'apparaît donc jamais dans le même environnement d'une photo à l'autre : elle est sur un plan devant le mur, et la perspective ne la fait pas figurer devant les mêmes détails. La petitesse de la tache implique que les points du sommet coloré ne figurent pas à côté d'autres points dans le même plan, et donc que notre détail n'a jamais les mêmes voisins. Il est donc comparable à du bruit.

Une tache plus étendue garantirait un motif identifiable lors de la corrélation dense d'une image à l'autre, et aurait donc plus de chances d'être reconstruite.

## b) Tache étendue

Nous essayons alors de grossir la taille de la tache de couleur. Nous choisissons dans un premier temps des couleurs unies, pour nous affranchir de l'effet de perspective qu'une texture nécessiterait de prendre en compte. Nous faisons plusieurs essais : tache ronde avec dégradé flouté des contours de 13 px de diamètre, tache aux contours nets de 15 px de diamètre. Nous essayons enfin d'ajouter les 12 arêtes du cube (traits épais de 3 px).

**Résultat** : Les dessins, attendus flottant devant le mur, n'apparaissent pas dans le nuage de points de liaison, et sont projetés sur le mur de derrière après corrélation dense.

**Interprétation** : Les points ne sont toujours pas reconnus comme homologues d'une image à l'autre puisque le cube n'apparaît pas dans son propre volume.

**Hypothèse** : Le manque de texture (les couleurs choisies sont homogènes) ne permet pas à MicMac de dégager des points homologues. Le cube n'est pas identifié comme appartenant à un autre plan et les couleurs de l'image maîtresse donnent sa couleur au modèle : le cube apparaît projeté sur le mur.

Il faudrait recourir à une texture marquée pour contourner ce problème.



FIGURE I.7 : Résultat de la reconstruction MicMac à partir des images sur lesquelles on a ajouté le dessin des sommets du cube (ici, taches nettes 15 px au-dessus de la fenêtre)

Notons par ailleurs que nous avons essayé de reconstituer le cube 3D seul, sans aucun arrière-plan (mais en donnant les paramètres de calibration établis en orientant le décor) à partir des mêmes prises de vue (sous les mêmes perspectives : la couche a été dupliquée depuis le fichier utilisé pour la retouche des images précédentes vers un nouveau fichier de dessin, afin d'obtenir exactement le même cube dans la même configuration que précédemment) : si Tapioca (détermination automatique des points de liaison de MicMac) n'a pas protesté, Tapas (détermination de la géométrie de la prise de vue) a signalé un problème de manque de points de liaison.

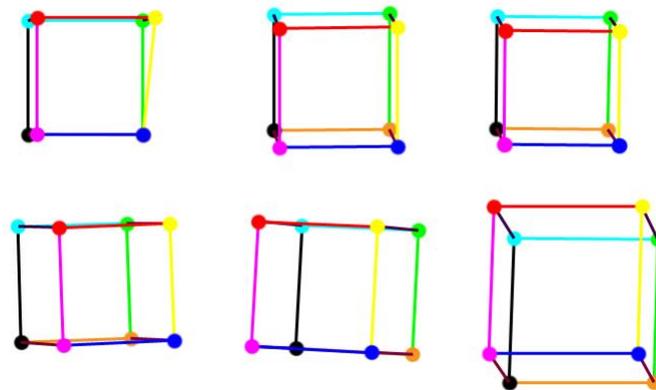


FIGURE I.8 : Cube dessiné selon les six perspectives correspondant aux six images de la prise de vue du décor.

La face avant correspond aux sommets rouge, jaune, bleu, rose.

## Test 2 : Vignette de pixels texturée

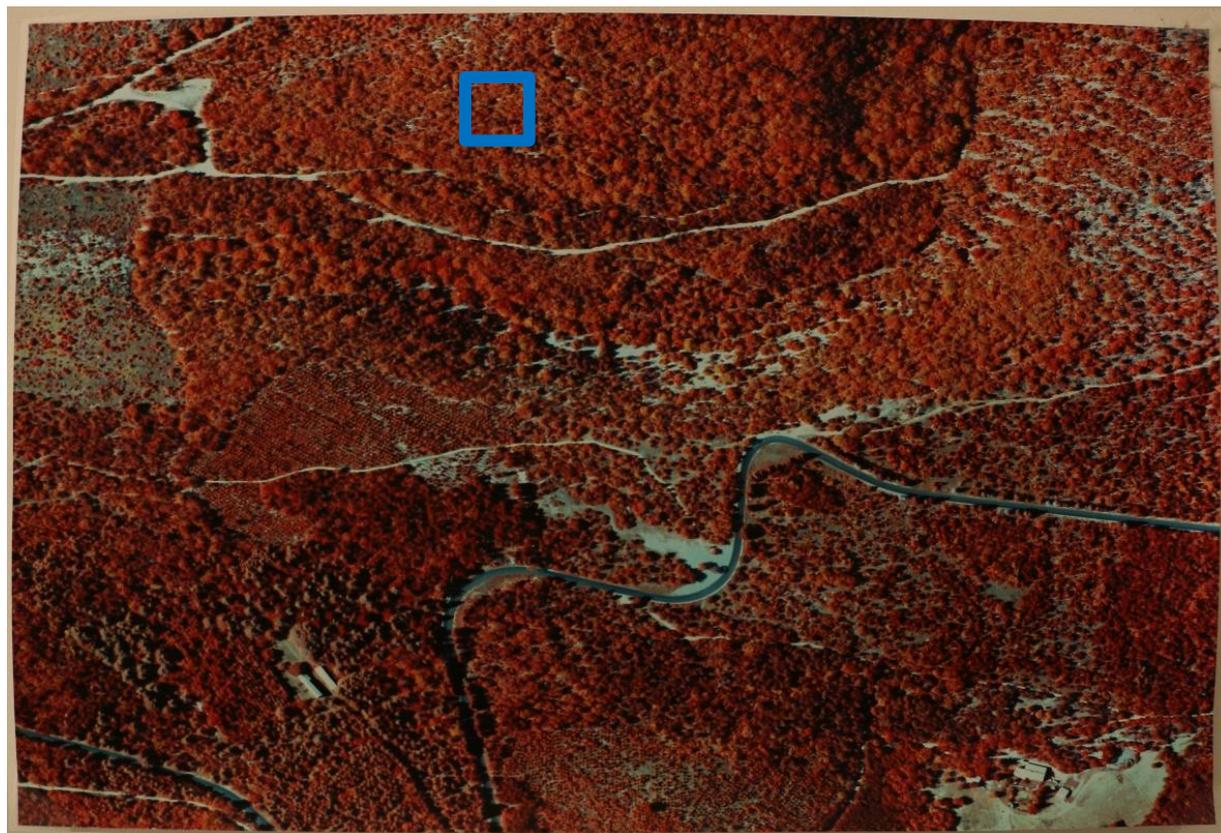


FIGURE I.9 : Élément de tableau texturé

On place maintenant dans les images une petite vignette de pixels texturée, aux emplacements calculés précédemment (l'un des coins est un ancien sommet du cube ; aucune déformation conforme à la perspective n'est appliquée sur la vignette). Cette expérience correspond toujours à ajouter des taches de couleur (de mêmes dimensions), mais les taches présentent maintenant l'avantage d'être texturées, contrairement aux expériences précédentes qui avaient échouées.

Nous avons commencé par faire une prise de vue sur le tableau choisi, dont un détail fera office de vignette (FIGURE I.9) : cinq images prises de différents points de vue. La reconstruction s'est particulièrement bien passée, avec un nuage de points de liaison très dense. Cette étape nous assure que la texture du détail choisi est bien traitée par MicMac.

La taille de la vignette, 15x15 px, a été choisie comme un intermédiaire entre deux cas extrêmes : le détail ponctuel (un pixel coloré, pour lequel le test a échoué) et une surface importante pour laquelle la perspective serait très significative. En effet, nous répétons le même motif dans toutes les images sans tenir compte de la prise de vue : il n'y a pas d'effet de perspective, le même détail est reproduit sur chaque vue. Un tel détail, de grande surface, reviendrait à essayer de reconstituer une image 3D à partir d'une même prise de vue, répétée. Cela ne peut pas fonctionner. Nous essayons ici de créer une tache texturée, sans qu'elle ne devienne une surface sujette à l'effet de perspective.

**Résultat** : On n'observe pas de points de la vignette dans le nuage de points de liaison. Les pixels sont à nouveau projetés sur le mur, après corrélation dense.

**Interprétation** : MicMac n'est toujours pas parvenu à trouver des points homologues.

**Hypothèse** : Deux explications sont possibles, correspondant aux deux cas extrêmes cités plus haut : la tache est trop petite (offrant trop peu de contexte aux points) et / ou pas assez texturée pour être repérable par corrélation dense (cas de la tache colorée homogène), ou bien elle est trop grande et la perspective attendue (et absente) est perçue comme une incohérence par l'algorithme, qui n'arrive donc pas à attacher de points homologues.

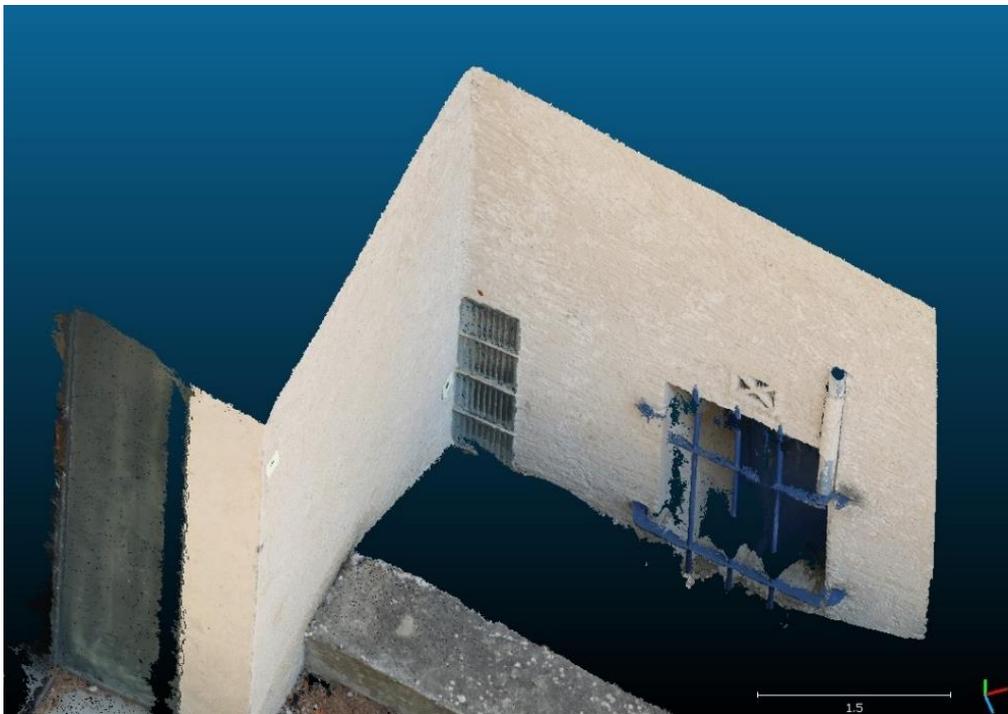


FIGURE I.10 : Résultats de la reconstruction MicMac avec les images auxquelles on a ajouté une vignette texturée (projetée au-dessus des vitres)

Pour éprouver l'hypothèse du manque de texture, nous avons relancé l'expérience avec une vignette hautement contrastée (toujours de dimensions 15x15 px).

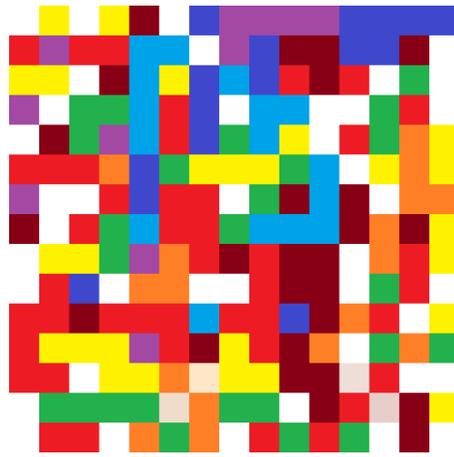


FIGURE I.11 : Vignette utilisée pour tester l'influence du contraste de la texture

Le résultat est le même : la vignette est projetée sur le mur.

### Test 3 : Sphère texturée

Pour s'affranchir du problème de perspective sur les bords de notre échantillon (point de fuite), nous essayons ensuite d'appliquer un disque texturé (bien que l'intérieur du disque ne respecte toujours pas la perspective et soit toujours le même pour chaque vue).



FIGURE I.12.A : Image du premier test avec une sphère



FIGURE I.12.B : Image du deuxième test avec une sphère



FIGURE I.12.C : Image du troisième test avec une sphère

On insère donc dans chaque image un disque, avec l'objectif (idéalement) de reconstituer une sphère, flottant devant le mur. La particularité de la sphère est que, quel que soit le point de vue duquel on la regarde, elle apparaîtra comme un disque dans l'image.

On effectue l'opération avec différents disques : un modèle trouvé sur Internet, un disque découpé dans un motif texturé, et un disque découpé sur le même modèle texturé sur lequel on aura au préalable appliqué une déformation sphérique.

On situe ces disques dans les images du décor grâce à une petite marque faite sur Photoshop®, en plaçant la marque sur l'un des points calculés avec la formule d'image (anciennement l'un des sommets de notre cube).

**Résultat :** Pour les trois images de disque, le centre du disque est reconstitué sur un plan devant le mur (plan attendu). MicMac arrive à reconstruire une partie de la sphère, en particulier celle dans l'axe de l'image maîtresse. Les bords extérieurs sont en partie incrustés dans le mur, derrière le disque.

**Interprétation :** La texture donnée au disque incrusté permet une reconstitution partielle.

**Hypothèse :** Le manque de perspective du motif intérieur n'a pas permis de trouver des points homologues sur l'ensemble du disque et donc de reconstruire la sphère entièrement.

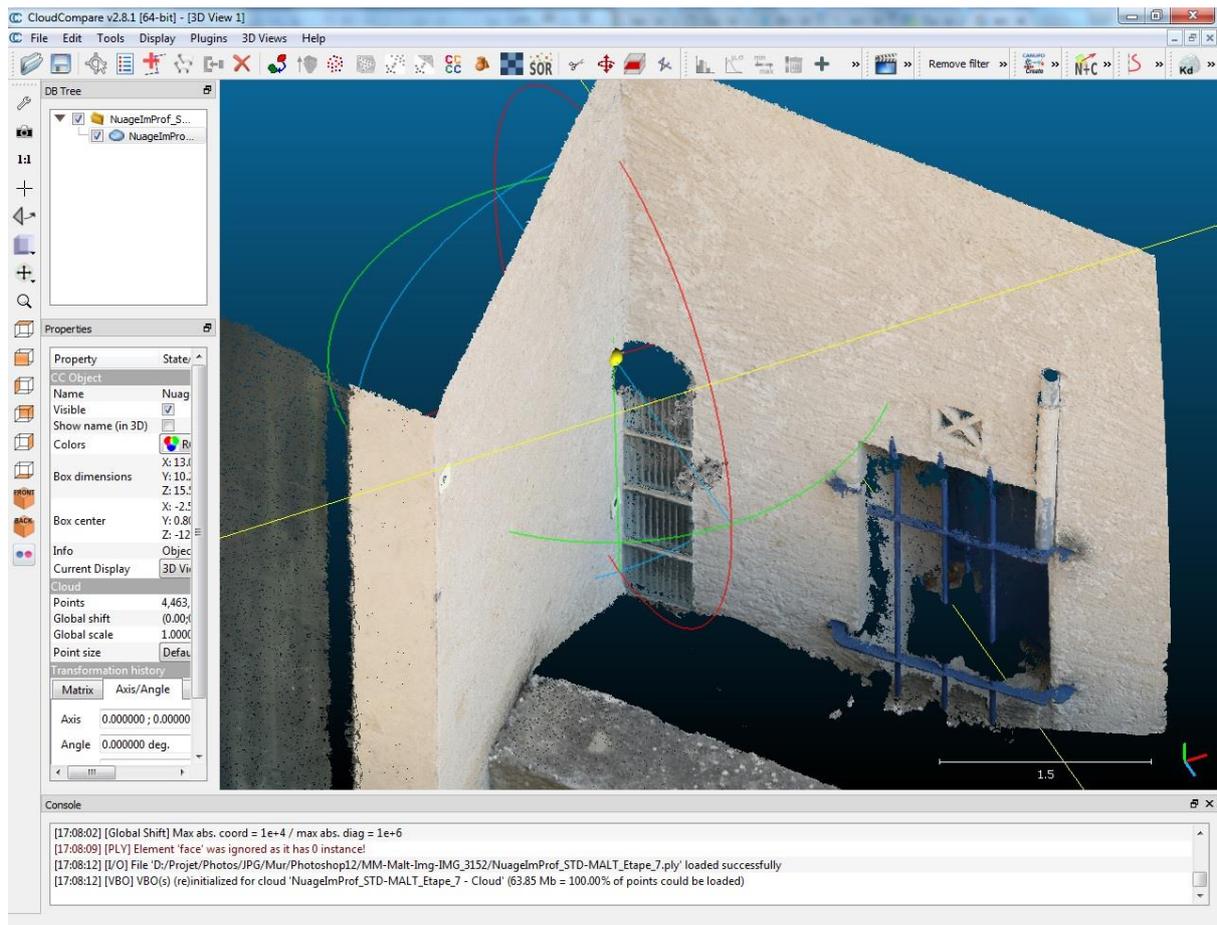


FIGURE I.13 : Résultats de la reconstruction MicMac à partir des images auxquelles on a ajouté un disque texturé

### 1.1.3 Synthèse

Nous avons effectué globalement quatre ensembles d'expériences dans cette première partie testant la méthode manuelle (pour laquelle l'objet incrusté n'est pas issu d'une prise de vue photogrammétrique). Les expériences se résument ainsi :

Expérience	Avantages	Inconvénients	Résultat
Sommet de cube : point ponctuel coloré (1 px et 2x2 px)	Pas de problème de surface (couleur homogène ou texture à gérer) Texturé par essence	Petit : jamais les mêmes pixels voisins	Visible ni dans le nuage de points de liaison, ni dans le nuage de points issu de la corrélation dense
Sommet de cube : tache colorée homogène (15 px de diamètre)	Affranchi des effets de perspective	Pas texturé	Pas de points de liaison Taches projetées sur le mur
Sommet de cube : vignette texturée (15x15 px)	Texturé	Pas de perspective	Pas de points de liaison Vignette projetée sur le mur
Disques texturés	Texturé Partiellement affranchi de la perspective (bords)	Perspective partielle (intérieur)	Points de liaison dans le plan attendu du disque Une partie du centre du disque apparaît dans des plans devant le mur

Une tache ponctuelle présente les avantages de contourner les problèmes de remplissage (couleur de la surface) : l'homogénéité de la surface gêne la détection de points homologues (points de liaison et corrélation dense), et une surface texturée impliquerait de prendre en compte la perspective, infiniment difficile à reproduire à la main. Notons qu'une surface homogène s'affranchit des problèmes de perspective (elle a le même aspect quel que soit l'angle de vue), et qu'une surface texturée permet la détection de points homologues.

Ainsi, chacune des méthodes a son avantage mais a le défaut de ne pas posséder, par essence, les avantages des autres, et de ce fait la reconstitution 3D échoue.

Les expériences que nous avons menées montrent que la détection de points homologues, essentielle à la reconstruction 3D, nécessite une tache suffisamment grande (plusieurs pixels), texturée, et respectant la perspective. Ces trois exigences sont bien difficiles à recréer à la main... Cela nécessiterait de travailler sur un logiciel de dessin 3D qui nous permettrait de récupérer les bonnes perspectives à incruster aux photos, et donc de recréer exactement les angles de la prise de vue ; cela pourrait se faire en imposant des déformations dictées par des coordonnées imposées à certains points, qui seraient celles des coordonnées images (des sommets du cube dans notre exemple).

L'autre possibilité est de recréer la prise de vue sur un objet existant : nous incrustons les photographies de cet objet (qui présentent l'avantage de rassembler les exigences dégagées : image texturée, étendue et respectant la perspective) dans celles du décor, et lançons une reconstruction 3D à partir de ces images retouchées. Il s'agit là d'une toute autre méthode, explorée dans une seconde partie (II).

Les échecs de mise en place nous amènent à nous poser des questions sur les conditions de détection des points homologues et sur celles de la reconstruction dense 3D : comment l'environnement d'un pixel est-il évalué ? Sur quelle surface ? Avec quelles hypothèses de régularité ? Et donc quelles sont la taille, la texture idéales pour une bonne détection de notre détail ? Ces questions relèvent des stratégies algorithmiques qui sont au cœur du logiciel que nous utilisons.

Nous n'avons pas poussé d'expérimentation sur ces points, ayant préféré développer d'autres aspects plus au cœur de notre sujet. Ces premiers tests nous permettent toutefois de conclure qu'un objet trop petit n'est pas reconstruit, et qu'il faut donc privilégier des objets d'une taille de plusieurs dizaines voire centaine de pixels (la sphère texturée 2 donnant les meilleurs résultats faisait 295 px de diamètre).

Nous avons toutefois soumis ces questions au développeur du logiciel MicMac, Marc Pierrot-Deseilligny, qui nous a confirmé de privilégier des surfaces supérieures à 100x100 px pour des raisons d'hypothèses de régularité appliquées par le logiciel.

D'autres questions enfin sont soulevées : quelle doit être la précision du placement du détail dans l'image pour que le modèle 3D puisse être généré ? A partir de combien de pixels d'écart à la position théorique l'incohérence de perspective est telle que la corrélation est impossible ? Quelle distance sur le terrain cela représente-il ?

Ces dernières questions sur la tolérance du placement du détail sont étudiées plus loin dans une partie dédiée (IV).

## 1.3 Protocole et recommandations

### Comment incruster un objet non issu d'une prise de vue photogrammétrique dans une scène ?

Le protocole suivant décrit de manière chronologique toutes les étapes de prises de vues pour l'incrustation d'un objet afin d'en réaliser une reconstitution 3D afin que le lecteur puisse la réaliser.

Les résultats des différents tests que nous avons menés nous amènent à faire la proposition de protocole suivante :

1/ Réaliser une acquisition photogrammétrique du décor dans lequel l'on souhaite incruster l'objet.

2/ Lancer les premiers traitements de mise en place sur cette prise de vue : orientation, calcul des paramètres de calibration.

3/ Étape conseillée : ce n'est pas strictement nécessaire à l'obtention du nuage 3D avec l'objet incrusté, mais lancer la corrélation dense pour obtenir le nuage de points 3D de la scène permet de vérifier, avant de se lancer dans les montages photo, que le lot d'images du décor se reconstitue bien et donc que la prise de vue est valide. En outre, il facilite par la suite la détermination de coordonnées de points terrain, et il permet de qualifier les résultats par comparaison des modèles 3D obtenus avant et après incrustation.

4/ Récupérer les données nécessaires aux calculs par application de la formule d'image : les paramètres de calibration de l'appareil (dont les coefficients de distorsion), et pour chaque image, la matrice rotation et les coordonnées du sommet de prise de vue.

5/ Déterminer les coordonnées terrain du point où l'on souhaite incruster l'objet, dans le repère local défini par MicMac lors de l'orientation relative des images.

Pour cela, il est possible de regarder les coordonnées des sommets de prise de vue des images, et comparer leurs différences au déplacement sur le terrain entre deux prises de vue. On obtient ainsi une idée de l'origine, de la direction des axes, et de l'échelle du repère. Il est alors possible d'intuiter des coordonnées terrain cohérentes.

Une autre méthode beaucoup plus simple, qui nécessite toutefois d'avoir généré au préalable le modèle 3D de la scène, consiste à afficher le nuage de points (dans CloudCompare par exemple) et à pointer et lire les coordonnées de points stratégiques, autour du point voulu (dans les trois dimensions), pour en déduire des coordonnées cohérentes pour le point terrain.

Notons que l'on peut choisir plusieurs points terrain, si la position de l'objet à incruster est définie par plusieurs points (sommets d'un polygone...). Il est alors conseillé de choisir les coordonnées terrain de l'un des points avec l'une des méthodes décrites ci-dessus, et de déduire

directement les coordonnées des autres points par rapport à ces premières coordonnées (en leur sommant un vecteur). Cela assure de donner à l'objet la géométrie voulue ; tandis que déduire les coordonnées de chaque point à partir du décor nous donne moins de contrôle sur la forme de l'objet.

**6/** À partir des coordonnées terrain du point choisi, calculer ses coordonnées image, pour chaque cliché, en appliquant la formule d'image.

**7/** Sous Photoshop® (ou autre logiciel de traitement d'image), insérer l'objet à incruster dans chaque image, en le plaçant aux coordonnées calculées (en plaçant par exemple toujours le même détail ponctuel de l'objet sur le point aux coordonnées connues).

**8/** Lancer la reconstruction MicMac avec les photomontages.

## **Contraintes**

En suivant ce protocole, on veillera à tenir compte de certaines contraintes :

- Les coordonnées du point terrain doivent être cohérentes. En particulier, il est important de s'assurer que l'objet se retrouve bien dans la scène !

Pour mener à des résultats satisfaisants, l'image que l'on cherche à incruster doit :

- Etre suffisamment grande (nous conseillons une surface dépassant 100x100 px) ;
- Etre texturée ;
- Respecter la perspective.

## 2 Incrustation d'un objet issu d'une prise de vue photogrammétrique

Le but de cette partie est d'incruster un objet existant dans un modèle 3D. Il s'agit donc d'effectuer une acquisition photogrammétrique d'un objet réel et de réaliser des vues semblables sur un autre décor. Il faut ensuite sélectionner l'image de l'objet dans chacune des vues simulées et l'incruster dans chacune des images de la scène. A partir des images modifiées, nous établissons le modèle 3D de la scène.

Pour ce faire, dans tous les tests qui suivent, nous avons procédé comme ceci :

- Des photos avec et sans l'objet à incruster ont été prises ;
- Les photos sont prises tous les 10 degrés pour que le recouvrement soit correct ;
- Une découpe de l'objet sur chacune des images a été réalisée afin de l'incruster dans les photos du décor ;
- L'objet découpé a été replacé dans l'image du décor.

Nous avons utilisé pour ces deux étapes le logiciel Photoshop®. Nous avons rédigé le tutoriel détaillé des étapes que nous avons suivies. Ce tutoriel figure en Annexe ;

- Les commandes suivantes sont lancées dans MicMac :

```
mm3d Tapioca All “*.jpg” 2000
mm3d Tapas RadialStd “*.jpg” Out=boite
mm3d AperiCloud “*.jpg” boite
mm3d C3DC MicMac “*.jpg” boite Out=boite_C3DC_MicMac.ply
mm3d C3DC Forest “*.jpg” boite Out=boite_C3DC_Forest.ply
```

Il n'est pas utile de lancer le C3DC MicMac et le C3DC Forest, les deux ayant la même utilité : la reconstitution 3D (la première dans le cas de scènes architecturales, la seconde dans le cas de scènes aériennes comportant des forêts). Dans le cadre de ce projet, nous exécuterons toutefois les deux méthodes de reconstruction, à des fins de comparaisons et d'analyse.

- Une analyse des résultats est réalisée.

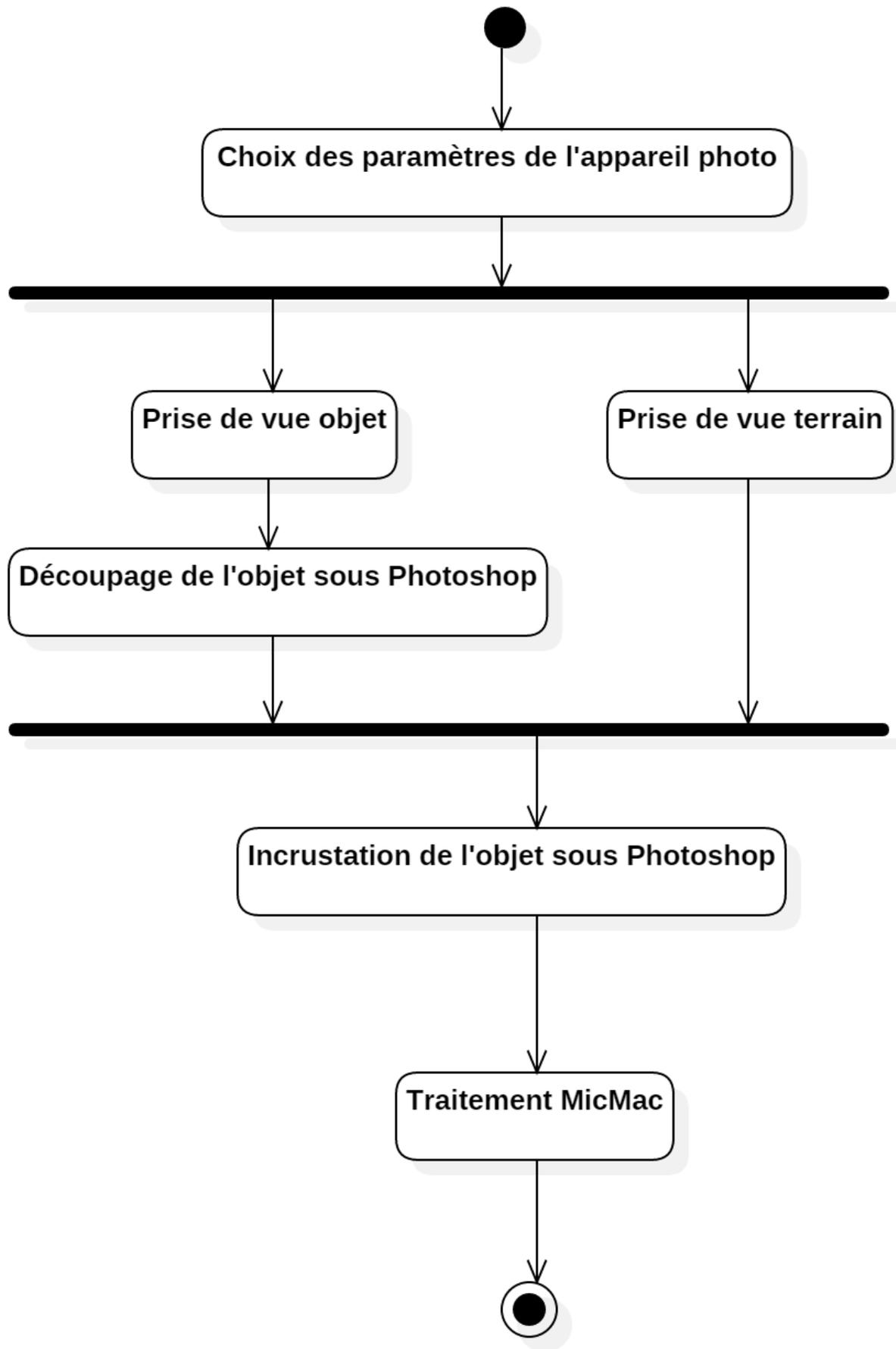


FIGURE II.1 : Diagramme d'activité de la procédure d'incrustation

## 2.1 Incrustation dans le même décor

Nous cherchons pour commencer à incruster un objet dans le même décor que celui dans lequel il a été photographié.

Notons que cette situation n'a pas lieu d'être dans un cas réel : si l'objet est photographié dans le décor voulu, il est inutile de l'isoler pour l'incruster dans ce même décor, repris en photo sans l'objet. La première prise de vue avec objet donne le modèle désiré.

Cependant, la démarche d'incrustation est la même que si les deux prises de vue avaient été effectuées dans des décors différents, et est bien plus simple à réaliser : il est possible de marquer au sol notre première prise de vue pour la reproduire ensuite ; tandis que lorsque la seconde prise de vue est faite dans un autre lieu, il est nécessaire de mettre en place un mode opératoire permettant de reproduire à l'identique la première prise de vue (mesure de distances, d'angles...).

Commencer par une incrustation dans le même décor permet ainsi de s'affranchir dans un premier temps de toutes ces considérations, pour mettre à l'épreuve le processus d'incrustation même.

### Test 1 : prise de vue circulaire en extérieur

#### Description :

Pour ce test, l'objet en question est une boîte de Pringles, et nous nous trouvons en extérieur. La boîte de Pringles a été choisie ici car ses couleurs différentes de celles du décor ainsi que sa géométrie régulière nous permettent un découpage rapide sur Photoshop®. En outre, elle est de taille satisfaisante : un objet trop petit offre moins de surface susceptible d'accrocher des points de liaison, et est moins bien reconstruit (comme le montrent nos tests partie I) ; un objet trop grand nécessite plus de photos pour en faire le tour avec un bon recouvrement. De plus, cet objet est rigide donc est moins susceptible de bouger pendant la prise de vue.

On marque au sol les coordonnées projetées de notre sommet de prise de vue ainsi que les angles de la photo pour prendre par la suite la même photo sans l'objet.

La deuxième phase consiste elle à prendre le décor sans l'objet, depuis les mêmes sommets de prise de vue.

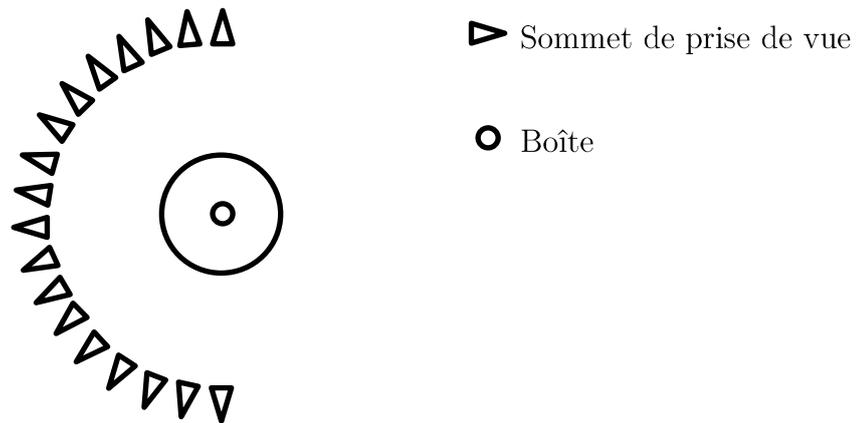


FIGURE II.2 : Schéma de la prise de vue (vue de dessus)



FIGURE II.3.A : Photo sans l'objet



FIGURE II.3.B : Photo avec l'objet

### Traitement :

Les calculs MicMac ont d'abord été lancés sur les photos avec l'objet afin de vérifier que le recouvrement est bon et que nos clichés sont corrects : on obtient un modèle 3D cohérent.

Suite à la découpe de l'objet, on le réincruste dans l'image homologue du décor.

L'AperiCloud se lance mais il existe très peu de points de liaisons, en particulier aucun sur l'objet, et le modèle 3D ne se lance pas.

La détection trop faible de points de liaison s'explique par le fait que les positions de deux points homologues diffèrent de leur position théorique (donnée par la formule d'image), d'une valeur supérieure à la tolérance de l'algorithme de détection de points homologues.

Cela est dû en partie au fait que la boîte n'est pas repositionnée exactement à la position attendue. La position de la boîte dans la prise de vue avec objet, et là où elle serait dans la prise de vue sans objet, ne coïncident pas exactement sur les images des deux prises : au moment du montage, les calques ne se superposent pas tout à fait. Le réajustement manuel du calque objet sur le calque du décor laisse une petite marge d'erreur, de quelques pixels, en translation et en rotation. Ces quelques pixels peuvent être au-delà de la tolérance de MicMac.

Cela est aussi dû au fait que les deux prises de vue ne sont pas strictement identiques : les angles diffèrent légèrement, d'une valeur encore une fois probablement supérieure à la tolérance de l'algorithme.

## Test 2 : prise de vue circulaire en intérieur

### Description :

Dans cette expérience, on choisit de faire quelques photos en intérieur, dans le coin d'une fenêtre, car la texture est bonne. On procède comme précédemment.



FIGURE II.4.A : Photo sans l'objet



FIGURE II.4.B : Photo avec l'objet

### Traitement :

L'AperiCloud se lance ; on remarque quelques points de liaisons au niveau de la boîte. Le modèle 3D se lance aussi, cependant l'objet n'apparaît pas. Un trou se trouve à sa place, toutes les informations derrière l'objet ne sont pas reconstituées.

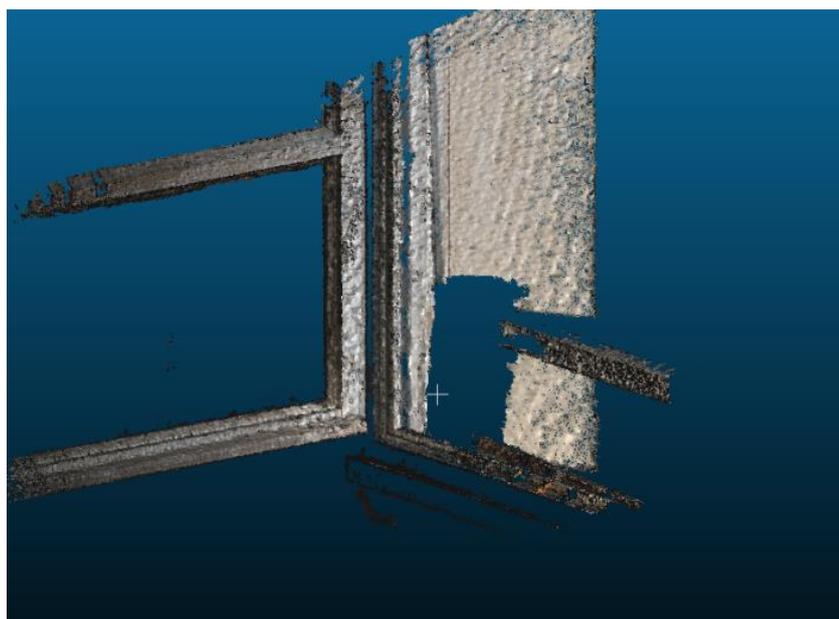


FIGURE II.5 : Résultats de la reconstruction C3DC MicMac dans CloudCompare

## **Bilan :**

On obtient le même problème que précédemment. Ce test nous a permis de comprendre que la méthode d'acquisition n'est pas bonne, car les angles, que nous avons pourtant cherché à reproduire au mieux à l'aide de marquages, ne sont pas les mêmes dans nos photos homologues. La précision n'est pas satisfaisante : un changement de méthode s'impose.

## **Suggestions :**

- Ne plus faire une phase avec et une phase sans l'objet, en parcourant pour chaque phase chaque position, mais faire pour chaque position la photo avec puis sans l'objet, en l'enlevant et le replaçant exactement à la même place. Dans ce cas-là, les angles resteraient les mêmes puisque l'appareil ne bougerait pas entre la photo avec et sans l'objet.

Notons toutefois que cette méthode n'est pas adaptée à un changement de décor, qui est pourtant tout l'intérêt d'une incrustation (changer de décor nécessite une prise de vue complète sur un lieu, puis une seconde, similaire et complète, ailleurs). Cette méthode nous permet cependant d'éprouver la précision nécessaire à la reconstruction 3D.

- Il nous semble de plus intéressant de vérifier la tolérance (voir partie IV) :
  - Faire un test en bougeant l'objet par translation sur les images et voir si la reconstitution est faisable.
  - Faire de même en inclinant l'objet.

### Test 3 : prise de vue circulaire avec la nouvelle méthode

#### Description :

On choisit ici d'appliquer la méthode précédemment évoquée. On prend donc pour chaque sommet de prise de vue un cliché avec et un cliché sans l'objet, sans bouger l'appareil photo.

On se déplace sur un quart de cercle autour de l'objet.

Pour que celui-ci puisse être replacé exactement au même endroit, trois clous ont été placés sur une embase, et trois trous ont été percés sous la boîte, pour que celle-ci s'emboîte sur l'embase scotchée au décor et ne bouge pas.



FIGURE II.6.A : Photo de l'embase



FIGURE II.6.B : Photo de l'objet sur l'embase

#### Traitement :

Le modèle 3D fonctionne, on retrouve bien notre boîte dans la reconstitution 3D.

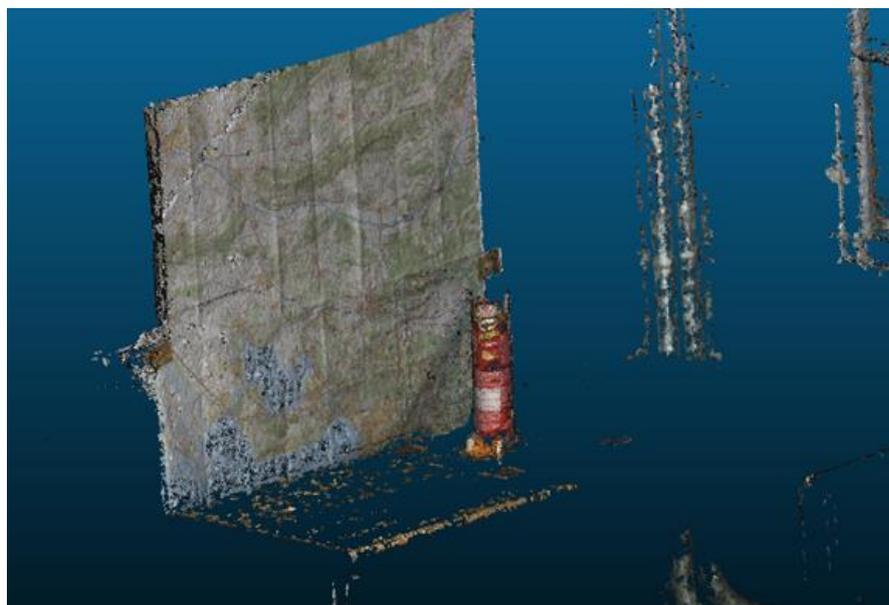


FIGURE II.7 : Résultats de la reconstruction C3DC MicMac dans CloudCompare

## **Bilan :**

On voit ici l'importance de l'orientation de l'appareil par rapport à l'objet. Cette méthode nous prouve qu'une grande précision est requise : les angles de prises de vues doivent être identiques, à un écart minime près, entre les photos homologues. Il nous reste maintenant à évaluer cet écart tolérable.

## **Suggestions :**

- Faire en sorte que l'objet soit pris selon les mêmes angles, en particulier lorsque l'on souhaite le replacer dans un autre décor.
- Le plus simple serait dans un premier temps de ne plus tourner autour de l'objet mais de prendre les photos parallèlement à un mur : les sommets de prise de vue sont plus faciles à fixer en translation.
- Il faudrait créer un dispositif, transportable d'un lieu de prise de vue à l'autre, permettant de déplacer l'appareil sans changer l'angle de vue entre les deux prises : un rail ?

Nous avons alors construit deux prototypes simples d'un tel rail, l'un rectiligne (pour les prises de vue en translation), et l'autre circulaire (pour les prises de vue à 360° autour de l'objet). Nous décrivons ce matériel dans la partie V de ce rapport.

## 2.2 Incrustation dans un autre décor

### Test 1 : prise de vue parallèle

#### Description :

La méthode consiste ici à prendre des photos d'une boîte dans une salle (objet à incruster), et celles d'un mur dans une autre salle (scène dans laquelle la boîte sera incrustée).

On réalise un marquage au sol, matérialisant l'emplacement de la boîte (emplacement effectif dans la première prise de vue avec objet, et attendu dans la seconde prise de vue sans objet).

Le marquage a deux intérêts.

Tout d'abord, des mesures de distances sont prises entre l'emplacement de la boîte et les sommets de prise de vue, ce qui permet de recréer la prise de vue à l'identique (principe illustré en partie V ; ici le marquage est directement scotché au sol mais le principe est le même). Ici, on mesure les distances du trépied au mur et de la boîte au mur afin de faire des clichés homologues.

Ensuite, le marquage permet de replacer la boîte au bon endroit dans la photo au moment du montage, pour corriger les petites différences de prises de vue et favoriser la reconstruction 3D.



FIGURE II.8.A : Photo du décor



FIGURE II.8.B : Photo de la boîte

#### Traitement :

Lorsque l'on replace la boîte sur le marquage au sol le modèle 3D fonctionne : les angles semblent cohérents.

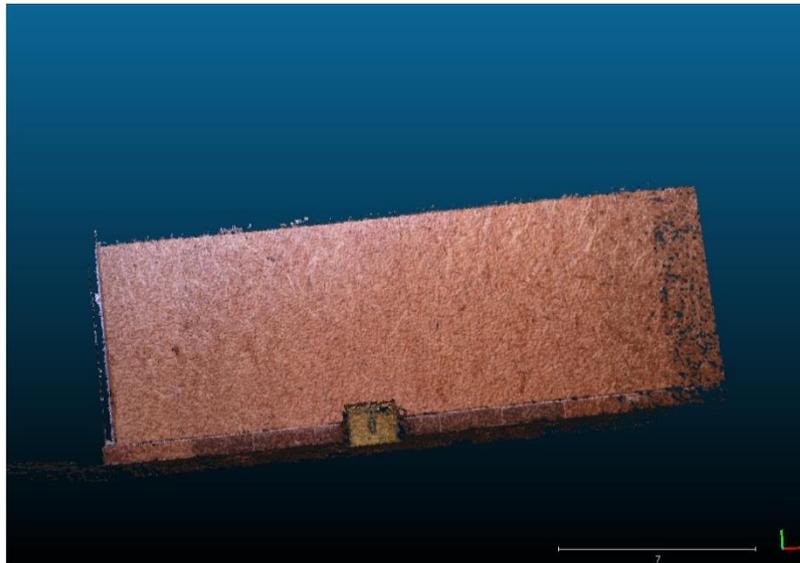


FIGURE II.9 : Résultats de la reconstruction C3DC MicMac dans CloudCompare

## Test 2 : prise de vue rectangulaire

### Description :

On choisit ensuite de prendre des clichés de la boîte en formation rectangulaire, pour couvrir plus de faces de l'objet. On utilise ici le rail construit mentionné plus haut (2.1, test 3) et décrit partie V.

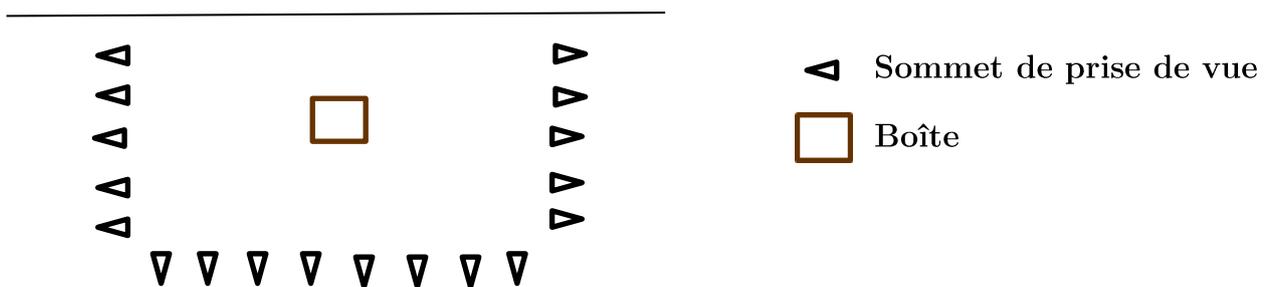


FIGURE II.10 : Schéma de la prise de vue, vu de dessus

### Traitement :

Le nuage se construit ; cependant le côté droit de la boîte, qui manque de luminosité, n'est pas restitué. Photoshop® nous permet de changer la luminosité de cette face de la boîte.

Le résultat est alors plus concluant, la qualité de la restitution est meilleure.

On remarque de plus que lorsque l'on change la luminosité de toutes les faces, le rendu est meilleur. Notons que nous n'augmentons pas le contraste et ne faisons pas apparaître de détails masqués jusque-là dans l'ombre : la luminosité de la boîte, plus sombre que le décor (la prise de vue objet était moins exposée), est simplement augmentée. Ce résultat nous amène à supposer que MicMac est sensible à la luminosité générale de la scène, et qu'un fort contraste local est moins bien reconstitué.

Le travail avec le rail nous simplifie vraiment la tâche. La prise de vue se fait plus rapidement et la précision semble meilleure.



FIGURES II.11.A ET II.11.B : Résultats de la reconstruction MicMac dans CloudCompare sans changer la luminosité



FIGURE II.12 : Résultats de la reconstruction MicMac dans CloudCompare en changeant la luminosité



FIGURE II.13 : Résultats de la reconstruction C3DC Forest dans CloudCompare sans changer la luminosité

**Suggestion :**

- Augmenter la luminosité directement durant la prise de vue pour ne pas avoir à la traiter sur Photoshop®. Il faut cependant faire attention à ce qu'il n'y ait pas trop de bruit et de flou dans les images.

### Test 3 : prise de vue circulaire

#### Description :

L'objet a été photographié sur deux tiers de cercle dans une salle.

Nous avons utilisé le rail circulaire que nous avons construit (voir partie V), qui permet de photographier l'objet tous les 10°.



FIGURE II.14.A : Photo de la boîte



FIGURE II.14.B : Photo du décor

#### Traitement :

C3DC avec l'option Micmac reconstruit correctement le décor et les arêtes de la boîte.

C3DC avec l'option Forest, la totalité des faces est visible.



FIGURES II.15.A ET II.15.B : Résultats de la reconstruction C3DC Forest dans CloudCompare

## 2.3 Incrustation dans un autre décor en extérieur

### Tests 1 et 2 : prises de vues parallèles

#### Description :

Nous avons jusque-là privilégié les tests en intérieur, a priori plus faciles à mettre en place. En effet, effectuer les prises de vue en extérieur ajoute deux difficultés majeures : gérer les grands écarts de luminosité, et la pauvreté des points de liaison (par rapport à une pièce fermée aux murs texturés).

Pour ces nouveaux tests, nous avons photographié la boîte dans une salle, puis le décor à l'extérieur. Nous avons mené un second test en photographiant la boîte et le décor tous deux en extérieur, mais en deux endroits différents. L'intérêt de cette démarche est de réussir à travailler avec des luminosités cohérentes (l'exposition en extérieur étant très supérieure à l'exposition en intérieur), sans avoir à régler les paramètres de l'appareil photo.

Le rail a ici aussi été utilisé pour que le respect des angles soit meilleur.



FIGURE II.16 : Photo du décor



FIGURE II.17 : Photo de la boîte en intérieur



FIGURE II.18 : Photo de la boîte en extérieur

### Traitement :

La boîte n'est pas reconstruite par la commande C3DC Micmac dans les deux cas, malgré quelques points de liaisons apparents. On obtient cependant la reconstruction 3D par la commande Forest.

Ces résultats nous permettent de conclure que la reproduction de la prise de vue n'est pas parfaite, les angles ne sont pas strictement les mêmes. Cet écart angulaire se situe entre la tolérance de Micmac et celle de Forest.

Pour le deuxième test, les luminosités cohérentes améliorent le rendu de la boîte, conformément aux observations faites plus haut.

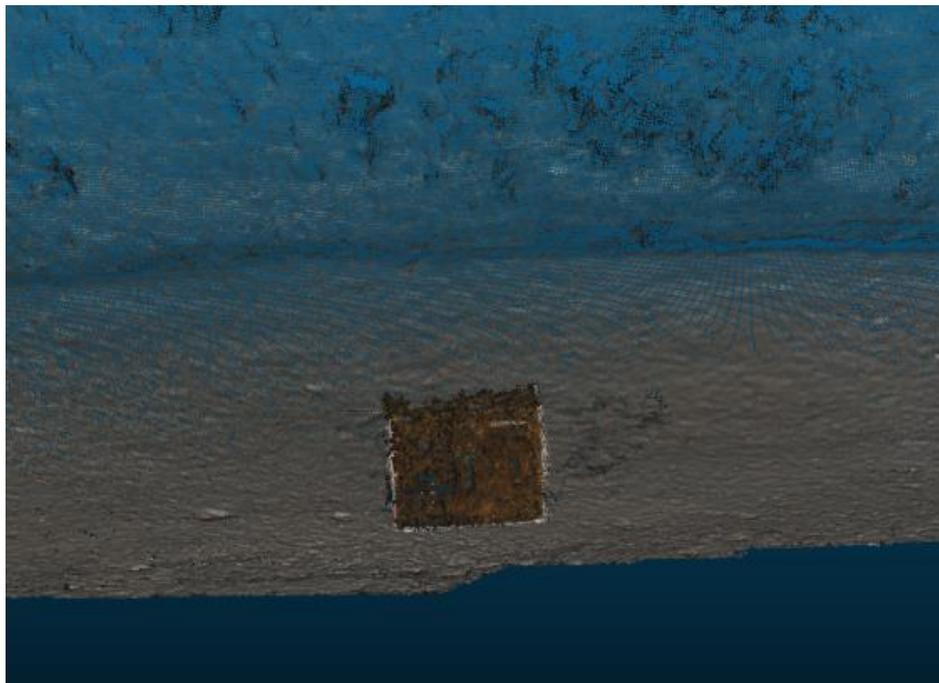


FIGURE II.19 : Résultat de la reconstruction C3DC Forest dans CloudCompare

### Suggestion :

- Il serait intéressant de déterminer la tolérance de Forest (sans doute moins exigeante que celle de MicMac) afin de se faire une idée plus précise de notre précision de travail.

## Test 3 : prise de vue circulaire

### Description :

La boîte a été photographiée sur un tiers de cercle, dans une salle du centre, et le décor a été photographié en extérieur, en utilisant le même mode opératoire que pour la première prise de vue.

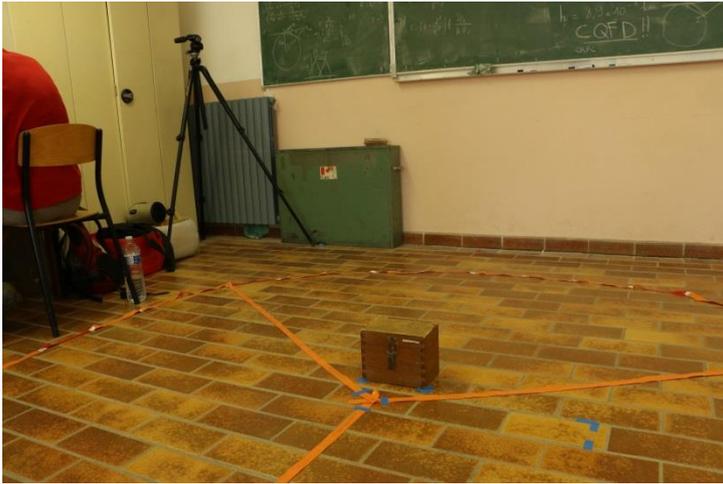


FIGURE II.20.A : Photo de la boîte



FIGURE II.20.B : Photo du décor

### Traitement :

Aucun point de liaison n'a été trouvé. L'orientation relative n'a pas pu se faire. La reconstruction 3D n'est donc pas lancée.

### Bilan :

On peut expliquer cela par le fait que le décor n'était pas assez texturé et qu'il était très loin de l'objet (arbres dans le fond), et par la grande luminosité dans les photos (grande différence d'exposition entre l'intérieur et l'extérieur), supprimant des détails du décor.

## 2.4 Protocole

### Comment incruster un objet issu d'une prise de vue photogrammétrique dans un nouveau décor ?

Grâce aux résultats des différents tests, nous pouvons déduire un protocole afin de réaliser une incrustation d'un objet issu d'une prise de vue photogrammétrique dans un modèle 3D :

1/ Il faut tout d'abord réaliser une prise de vue de l'objet dans son décor. Pour cela, il est indispensable que le sol soit plat pour que les angles restent les mêmes d'une prise de vue à l'autre. L'utilisation du rail (voir partie V), parallèle ou circulaire, est conseillé pour augmenter la précision et gagner du temps. Afin de repositionner l'objet dans le décor, il faut mesurer les distances des coins de l'objet aux coins du rail.

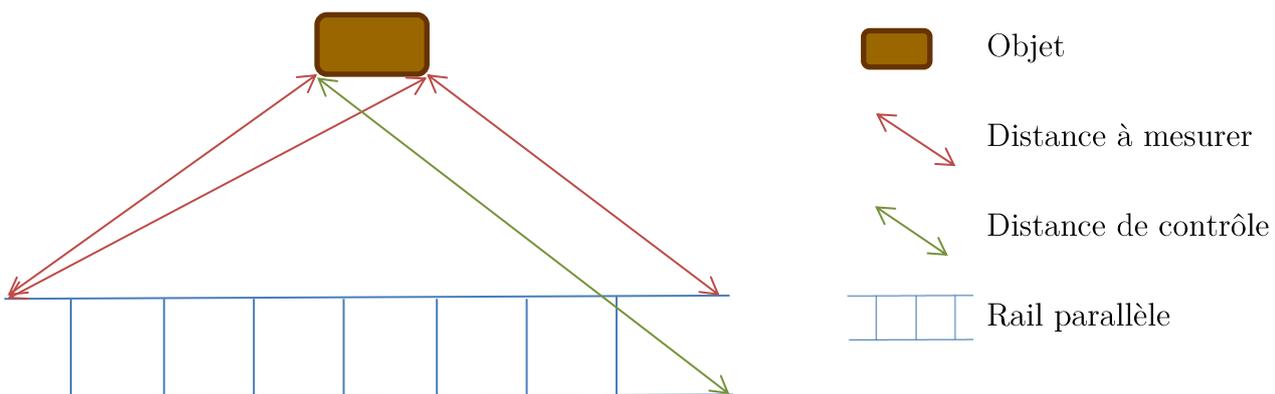


FIGURE II.21 : Exemple de distances à mesurer pour replacer le rail parallèle

Une fois que le rail est bien positionné par rapport à l'objet, il suffit de poser un pied du trépied sur la première ligne à une intersection et un autre sur la deuxième ligne (on marquera par un trait de stylo l'emplacement des pieds). On positionne alors l'appareil photo sur le trépied de telle sorte que l'objet soit dans le champs pour toute la prise de vue.

Il faut ensuite s'attaquer au réglage de l'appareil photo. Entre les deux prises de vues, il faut veiller à ne changer ni la focale, ni la mise au point. Certains paramètres comme l'ISO pourront être changés, si la différence de luminosité le requiert (par exemple en extérieur).

Une fois ceci effectué, il ne faut plus toucher aux réglages et à la position de l'appareil sur son trépied.

Après chaque photo prise, on déplace le premier pied sur l'intersection qui suit et ainsi de suite.

2/ Il faut ensuite réaliser une prise de vue du décor, avec ici aussi un sol plat, puisqu'il faut réaliser une prise de vue semblable. On replace le rail grâce aux mesures précédentes, et on marque l'emplacement de la boîte au sol pour pouvoir la replacer manuellement dans Photoshop®.

3/ On récupère toutes les photos. Sur Photoshop® (ou autre logiciel de retouche image), il faut alors découper l'objet sur chacune des photos de la prise de vue avec objet, et le replacer dans les photos du décor, à l'endroit marqué au sol.

4/ La dernière étape est le traitement des images sous MicMac. Elle consiste à lancer les lignes de commandes suivantes dans le terminal :

```
mm3d Tapioca All “. *jpg” 2000
mm3d Tapas RadialStd “. *jpg” Out=boite
mm3d AperiCloud “. *jpg” boite
mm3d C3DC MicMac “. *jpg” boite Out=boite_C3DC_MicMac.ply
mm3d C3DC Forest “. *jpg” boite Out=boite_C3DC_Forest.ply
```

L'orientation relative des photos est effectuée si tout se passe correctement. L'AperiCloud nous permet de voir les points de liaisons (on utilise CloudCompare pour l'ouvrir).

Les deux dernières lignes de commandes nous permettent d'obtenir des reconstitutions 3D du montage. Il n'est pas utile de lancer les deux lignes. Cependant la tolérance de Forest est plus grande que celle de MicMac, et Forest fonctionne donc plus souvent, donnant plus de détails (mais le traitement est plus long et les détails sont moins précis). On pourra aussi densifier les nuages de points en prenant plus de photos de la scène ou de l'objet.

On obtient ainsi le modèle 3D de notre objet dans un nouveau décor.

## Limites

- On ne parvient pas à replacer l'objet dans le modèle 3D si le sol est irrégulier.
- On doit respecter une grande précision.
- Les paramètres de l'appareil photo ne doivent pas changer entre les deux prises de vues.

## 2.5 Piste de méthode alternative : par torsion des images de la seconde prise de vue



FIGURE II.22.A : Image de repère



FIGURE II.22.B : Image du même repère selon un point de vue légèrement différent

On effectue un test de recalage en prenant en photo une boîte, en plaçant dans le champ de prise de vue un trièdre servant de repère physique. On effectue plusieurs clichés, avec des sommets de prise de vue ayant des positions proches, puis on recalc certaines prises de vues sur une image maîtresse à l'aide du repère.

On pourrait ainsi idéalement s'affranchir de la connaissance des sommets de prise de vue d'une scénographie, et donc effectuer la prise de vue d'un objet à incruster et celle d'un décor indépendamment l'une de l'autre, pourvu que le repère soit présent dans les deux prises.

La difficulté de la méthode réside dans le processus de recalage des images sur le repère ; on applique sous Photoshop® une transformation manuelle de *Torsion* à l'image de l'objet pour venir la caler sur le repère de l'image du décor. Les 7 paramètres (translation, rotation, facteur d'échelle) ne sont pas visualisables en transformation manuelle. Il est possible de recalibrer le repère, mais pas au point d'arriver à une superposition exacte.

On atteint alors l'une des limites de cette méthode : selon les prises de vues, pas les mêmes détails de l'objet ne seront visibles. En outre, on ne peut pas faire apparaître une face qui n'a pas été photographiée. La déformation de l'objet ne doit pas induire une fausse réalité, c'est-à-dire de créer une vue impossible ou incohérente. Les prises de vue doivent donc être très proches, et cette méthode ne pourrait être qu'un ajustement, complémentaire de méthodes garantissant une bonne similarité des deux prises de vue.

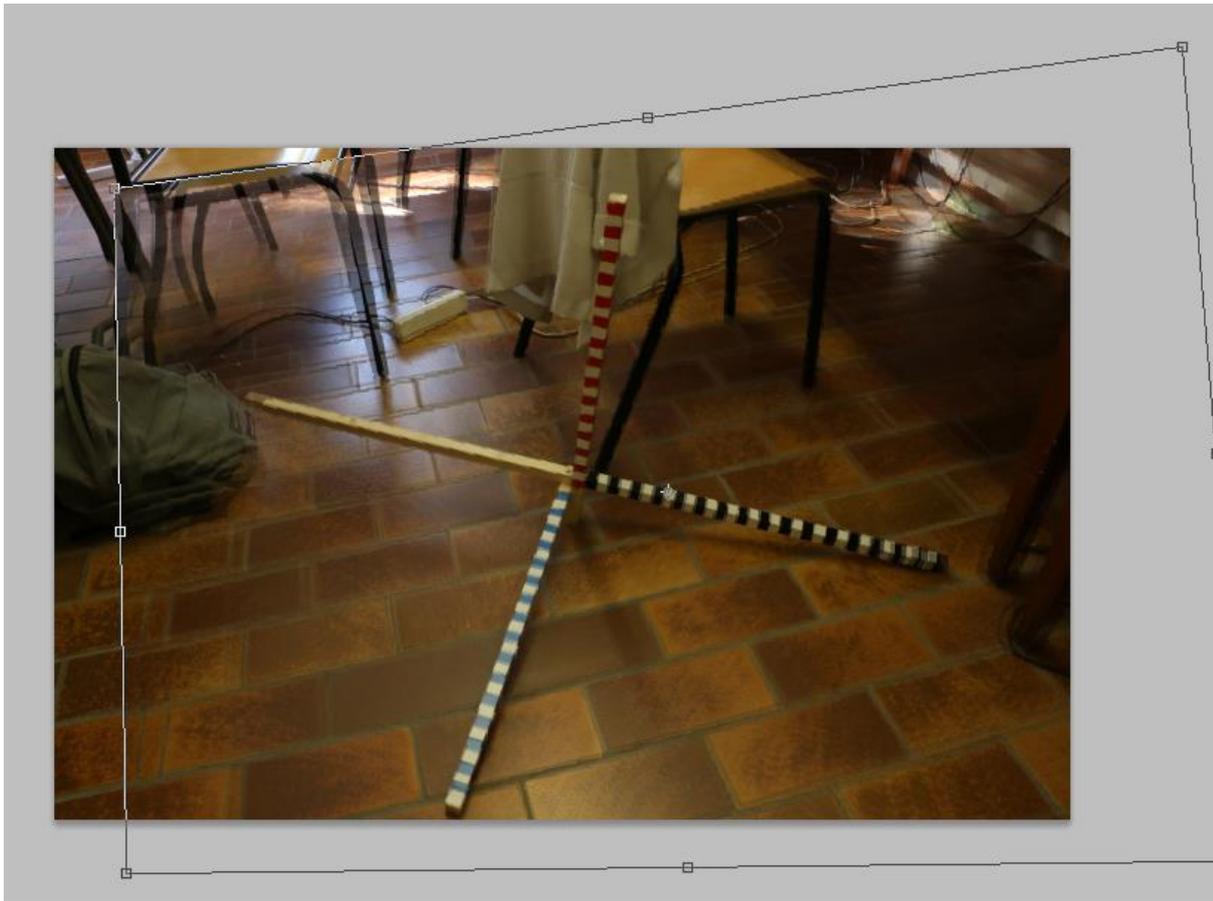


FIGURE II.23 : Superposition des deux images (le calque supérieur est légèrement transparent). La sélection, rectangulaire initialement, rend compte de la torsion nécessaire pour faire coïncider les deux repères.

Face au manque de résultat de cette méthode, on la laissera de côté dans l'élaboration du protocole d'acquisition.

## 3 Suppression d'un objet dans une scène

### 3.1 Description

Le principe de la suppression est d'ajouter, par-dessus l'image de l'objet à supprimer, l'image du fond qui serait visible si l'objet à supprimer n'était pas là.

En effet, simplement supprimer l'image de l'objet, sans la remplacer par une autre information, laisserait dans le modèle 3D une ombre (absence de points) à la place de l'objet, ce qui forme un trou dans le décor et n'est pas un rendu esthétique et cohérent. Il convient donc d'ajouter de l'information à la place de celle contenant l'image de l'objet ; et en toute logique, cette information doit être celle de l'arrière-plan, qui viendra combler le trou laissé dans le décor en supprimant l'objet (ou en d'autres termes, supprimer un objet dans la réalité laisse apparaître ce qu'il cachait derrière lui, et c'est cette information que nous tentons de reconstruire).

La suppression se ramène donc à l'ajout d'un objet (qui est une portion d'arrière-plan) avec deux contraintes supplémentaires : cette portion doit couvrir entièrement l'image de l'objet à supprimer sur les images retouchées, et elle doit être placée sur les images de telle sorte qu'elle soit reconstruite dans la continuité du mur qu'elle prolonge.

Le fait que l'objet ajouté soit une portion de l'arrière-plan entraîne donc des difficultés nouvelles.

Une première difficulté est d'assurer la continuité de l'arrière-plan en termes de position (par exemple, si l'arrière-plan est un mur, la portion de mur ajoutée doit lui être coplanaire) : la perspective doit être respectée, et donc les portions d'arrière-plan doivent être ajoutées sur des points homologues, et correspondant aux positions prolongeant l'arrière-plan derrière l'objet.

Un second enjeu est de reconstituer une portion d'arrière-plan qui soit dans la continuité de celui apparaissant sur les clichés en termes d'aspect (on cherche à réduire la délimitation de la portion ajoutée). Or, ceci est d'autant plus difficile que l'image du mur à ajouter est précisément indisponible puisque l'objet la cache : il faut la recréer, à partir d'autres éléments du décor (par exemple, une portion de mur voisine et visible sur les clichés). Mais recréer l'arrière-plan implique la contrainte que celui-ci soit suffisamment simple (un mur par exemple ; alors qu'un arrière-plan composé de plein d'objets, partiellement masqués par l'objet à supprimer, à recréer pour chaque vue, est extrêmement complexe). Nous avons ainsi ici une première limitation : l'objet à supprimer ne doit pas être devant un fond complexe.

Notons que l'on pourrait envisager une prise de vue photogrammétrique de l'arrière-plan sans l'objet, à incruster dans les images avec l'objet, à la place de celui-ci, pour le supprimer tout en recréant le décor derrière (et l'on se ramènerait alors précisément au cas

d'ajout d'objet étudié en partie II de ce rapport), mais la démarche a moins d'intérêt : s'il est possible de photographier la scène sans l'objet à supprimer, la suppression en post-traitement de l'objet n'est pas pertinente. On se place donc pour nos expérimentations dans le cas où l'image du fond n'est pas accessible.

## 3.2 Expérimentations

Nous avons mis en place plusieurs expériences, partant de la plus simple en termes de traitements (et la moins précise, donc la moins susceptible de rendre un bon résultat) à la plus rigoureuse. Notre objectif est de dégager les traitements minimaux nécessaires pour obtenir un bon rendu, et donc ainsi de proposer un protocole optimal, compromis entre la complexité du traitement et l'esthétique du modèle 3D créé.

Nous proposons d'abord une description du mode opératoire de chacun de ces tests, illustrée de photos ; les résultats sont donnés en-dessous dans un tableau comparatif.

### Modes opératoires

Les nuages de points sont obtenus avec la commande *Malt* de MicMac.

#### Test 1 : Correcteur Photoshop®

Nous utilisons l'*Outil Correcteur Localisé* de Photoshop®. Il permet d'appliquer la couleur du fond (couleur autour de l'objet) sur l'objet à recouvrir, en en gardant une texture approchée, mais aléatoirement et selon le passage du pinceau. La texture recrée n'est donc pas strictement la même d'une image à l'autre.

Les tests 1 à 6 s'appuient sur les mêmes images avant retouche.

Images à l'origine du modèle



FIGURE III.1 : L'une des six photos de la scène, avant retouche (Tests 1 à 6)



FIGURE III.2 : La même photo, retouchée (Test 1) : la grille d'aération a été bouchée



FIGURE III.3 : Détail de la photo avant retouche : zoom sur la grille (Tests 1 à 6)



FIGURE III.4 : Détail de la photo retouchée (Test 1) : zoom sur la grille rebouchée

## Modèle 3D obtenu



FIGURE III.5 : Modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées (Tests 1 à 6)



FIGURE III.6 : Résultat Test 1  
Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées :  
suppression de la grille

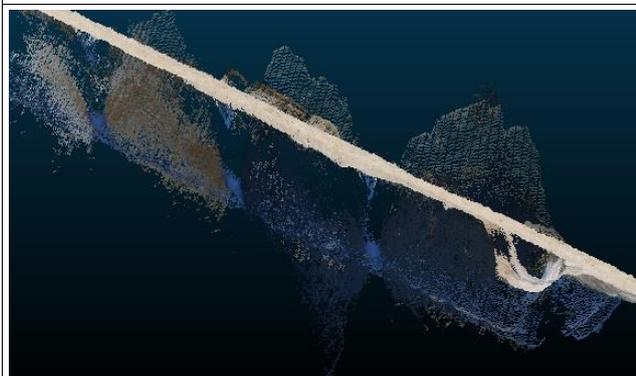


FIGURE III.7 : Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées, vu de haut (verticale de la grille)

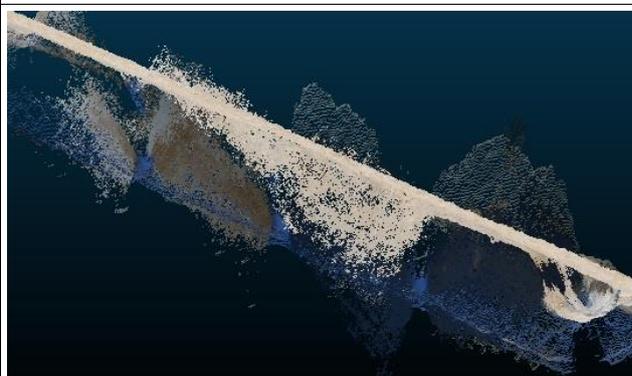


FIGURE III.8 : Résultat Test 1  
Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées,  
vu de haut (verticale de la grille bouchée)

## Test 2 : Morceaux de mur différents

L'objet masquant est une portion de mur découpée à côté de l'objet à masquer, dans chaque image. La sélection est aléatoire, et sa position sur l'objet aussi.

### Images à l'origine du modèle

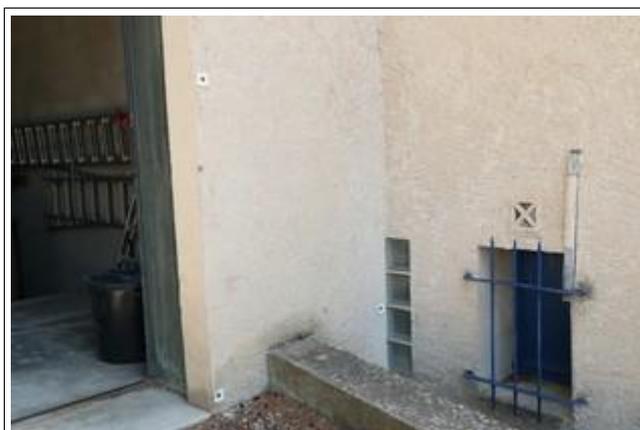


FIGURE III.9 : Photo avant retouche  
(Tests 1 à 6)

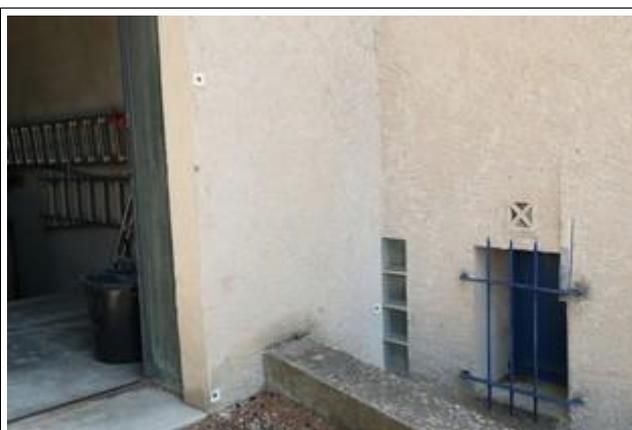


FIGURE III.10 : Photo retouchée (Test 2) : la  
gouttière est masquée



FIGURE III.11 : Détail de la photo avant  
retouche : zoom sur la gouttière  
(Tests 1 à 6)



FIGURE III.12 : Détail de la photo retouchée  
(Test 2) :  
zoom sur la gouttière

Masque utilisé pour la retouche des photos



FIGURE III.13 : Aspect d'un échantillon de mur utilisé pour masquer la gouttière

Modèle 3D obtenu



FIGURE III.14 : Résultat Test 2  
Modèle 3D obtenu à partir des photos non  
retouchées  
(Tests 1 à 6)



FIGURE III.15 : Résultat Test 2  
Modèle 3D obtenu à partir des photos  
retouchées :  
suppression de la gouttière



FIGURE III.16 : Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées : zoom sur la gouttière (Tests 2 à 6)



FIGURE III.17 : Résultat Test 2 Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées : zoom sur la gouttière supprimée



FIGURE III.18 : Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées : zoom sur la gouttière Vu de haut (verticale de la gouttière) (Tests 2 à 6)



FIGURE III.19 : Résultat Test 2 Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées : zoom sur la gouttière supprimée Vu de haut (verticale de la gouttière)

### Test 3 : Même morceau sur chaque image

L'objet masquant est une portion aléatoire de mur découpée dans la première image, et collée dans chacune. Il est placé aléatoirement sur l'objet à supprimer.

Image à l'origine du modèle



FIGURE III.20 : Détail de la photo retouchée (Test 3) : la gouttière est masquée

Modèle 3D obtenu



FIGURE III.21 : Résultat Test 3  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de face



FIGURE III.22 : Résultat Test 3  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de biais

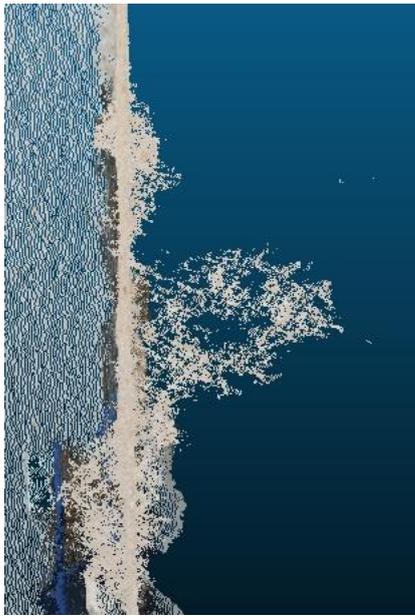


FIGURE III.23 : Résultat Test 3  
 Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
 photos retouchées :  
 zoom sur la gouttière supprimée  
 Vue latérale, dans le plan de la  
 reconstruction du masque de la gouttière



FIGURE III.24 : Résultat Test 3  
 Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
 photos retouchées :  
 zoom sur la gouttière supprimée  
 Vu de haut (verticale de la gouttière)

## Test 4 : Même morceau bien placé

Comme précédemment, l'objet masquant est une portion aléatoire de mur découpée dans la première image, et collée dans chacune. Dans ce test, l'un des coins de la sélection est placé toujours sur le même point (points homologues dans les différentes vues). Les coordonnées image de ce point sont calculées grâce à la formule d'image, avec l'algorithme codé lors des tests d'ajout d'objet, et à partir d'un point choisi par visualisation du nuage, dont on a récupéré les coordonnées terrain avec CloudCompare.

Image à l'origine du modèle



FIGURE III.25 : Détail de la photo retouchée (Test 4) : la gouttière est masquée

Modèle 3D obtenu



FIGURE III.26 : Résultat Test 4  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de face



FIGURE III.27 : Résultat Test 4  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de biais, face au plan de la reconstruction  
du masque de la gouttière  
(vue de la reconstruction la plus complète)



FIGURE III.28 : Résultat Test 4  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de haut (verticale de la gouttière)



FIGURE III.29 : Résultat Test 4  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des  
photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu orthogonale au plan de la reconstruction  
du masque de la gouttière : on voit que les  
points forment un plan biais

## Test 5 : Quatre coins bien placés

Nous visualisons dans CloudCompare le modèle 3D du décor avec l'objet à supprimer. Nous choisissons quatre points dont nous notons les coordonnées terrain. Ces quatre points sont les quatre coins de la portion de mur voisine à l'objet, qui sera copiée et viendra le masquer.

Nous calculons les coordonnées image de ces quatre coins dans chacun des clichés.

Nous choisissons de même quatre points entourant l'objet à supprimer, dont nous calculons les coordonnées image dans chacun des clichés.

Dans chaque vue, nous découpons alors le pan de mur délimité par les coordonnées image calculées (la portion de mur masquant l'objet est récupérée dans l'image-même, pour chaque image), et nous venons le positionner aux coordonnées calculées.

Image à l'origine du modèle



FIGURE III.30 : Détail de la photo retouchée (Test 5) : la gouttière est masquée

## Modèle 3D obtenu



FIGURE III.31 : Résultat Test 5  
Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées



FIGURE III.32 : Résultat Test 5  
Détail du modèle 3D obtenu à partir  
des photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vue de face

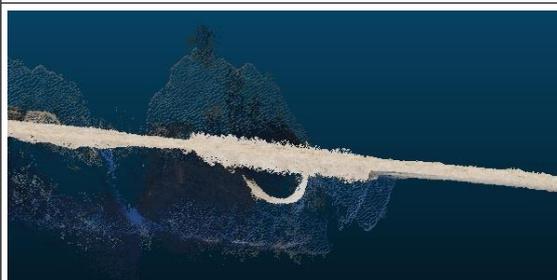


FIGURE III.33 : Résultat Test 5  
Détail du modèle 3D obtenu à partir  
des photos retouchées :  
zoom sur la gouttière supprimée  
Vu de haut (verticale de la gouttière)

## Test 6 : Quatre coins bien placés et bords estompés

Les images sont celles du test précédent, mais les bords de la sélection masquant l'objet ont été fondus avec le reste du fond, atténuant les différences de couleur et ainsi intégrant mieux le masque dans le décor. Nous avons pour cela utilisé l'Outil *Correcteur Localisé* (déjà utilisé dans le premier test).

Nous prenons soin de l'appliquer sur une surface très fine, sur les bords de la portion de mur ajoutée : plus la surface traitée est grande, plus les couleurs seront mélangées et le raccord sera estompé, mais plus la surface perdant la possibilité d'accrocher des points de liaison est importante (et moins la reconstruction sera bonne). Rappelons en effet que cet outil recrée une texture aléatoirement, selon les couleurs environnantes et la trajectoire du pinceau. Elle sera donc différente d'une image à l'autre, et les points homologues seront perdus.

### Images à l'origine du modèle

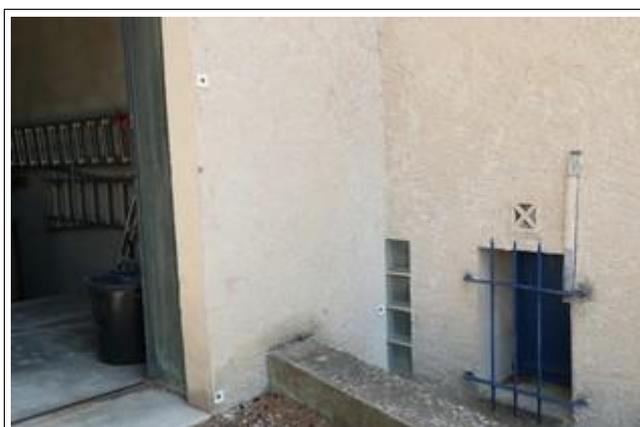


FIGURE III.34 : Photo avant retouches

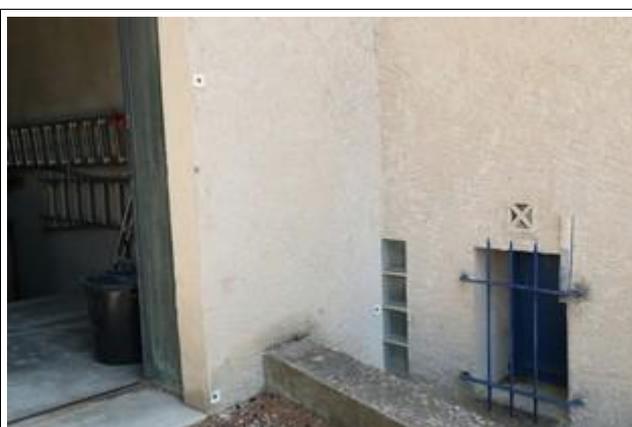


FIGURE III.35 : Photo retouchée (Test 6) : la gouttière est masquée



FIGURE III.36 : Détail de la photo avant retouche :  
zoom sur la gouttière



FIGURE III.37 : Détail de la photo retouchée  
(Test 6) :  
la gouttière est masquée

### Modèle 3D obtenu



FIGURE III.38 : Modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées (Tests 1 à 6)



FIGURE III.39 : Résultat Test 6  
Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées



FIGURE III.40 : Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées : zoom sur la gouttière



FIGURE III.41 : Résultat Test 6  
Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées : zoom sur la gouttière supprimée



FIGURE III.42 : Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées : zoom sur la gouttière supprimée Vu de haut (verticale de la gouttière) (Tests 2 à 6)



FIGURE III.43 : Résultat Test 6 Détail du modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées : zoom sur la gouttière supprimée Vu de haut (verticale de la gouttière)

## Test 7 : Quatre coins bien placés sans calcul

La portion de fond masquant l'objet est placée en faisant coïncider les coins de la sélection avec toujours les mêmes détails du fond, dans chaque vue (même méthode que l'ajout, partie I.1). L'outil *Torsion* de Photoshop® est utilisé pour la déformation, recréant artificiellement la perspective sur le tronçon ajouté.

Notons que cette méthode permet de s'affranchir de tout calcul.

### Images à l'origine du modèle

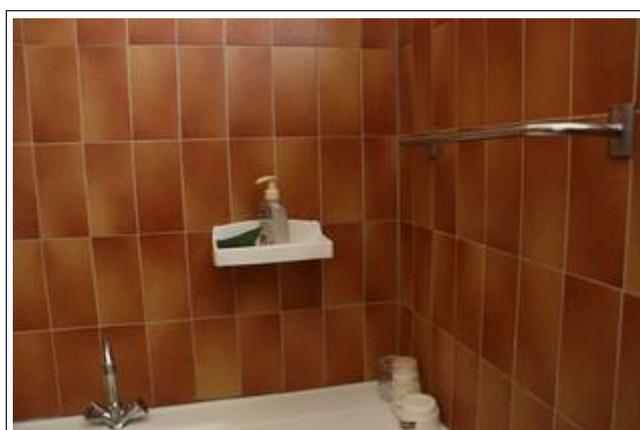


FIGURE III.44 : L'une des cinq photos à l'origine du modèle, avant retouche

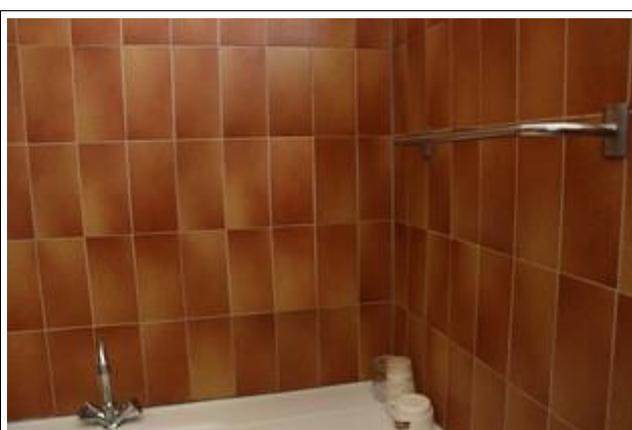


FIGURE III.45 : La même photo, après retouche : le porte-savon est masqué

### Masque utilisé pour la retouche des photos

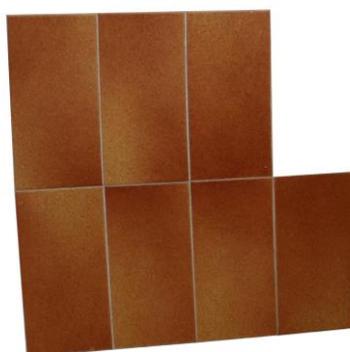


FIGURE III.46 : Quelques carreaux du mur de gauche sont copiés, déplacés et déformés pour compléter le carrelage par-dessus le porte-savon

### Modèle 3D obtenu



FIGURE III.47 : Modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées



FIGURE III.48 : Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées : le porte-savon est supprimé



FIGURE III.49 : Modèle 3D obtenu à partir des photos non retouchées  
Vue latérale  
Le mur est sans épaisseur



FIGURE III.50 : Modèle 3D obtenu à partir des photos retouchées  
Vue latérale  
Le nuage de points ne présente aucune épaisseur anormale

## Résultats

Avec toutes les méthodes, l'objet à supprimer a disparu, remplacé par le mur (plus ou moins bien reconstruit selon la méthode).

Test	Avantages	Inconvénients	Résultat	Bilan
Test 1 : Correcteur Photoshop®	Très rapide et facile	Texture différente dans chaque cliché	Pas de points de liaison Nuage de points occupant un volume autour de la section ajoutée, moins dense, trou au milieu	Le fond n'est pas reconstitué. <b>Échec de la méthode.</b>
Test 2 : Morceaux de mur différents	Rapide et simple à réaliser	Les portions ajoutées ne sont pas homologues (défavorise les points de liaison)	Pas de points de liaison Nuage de points occupant un volume autour de la section ajoutée, moins dense	Le fond n'est pas reconstitué. <b>Échec de la méthode.</b>
Test 3 : Même morceau sur chaque image	Rapide et simple à réaliser Les portions ajoutées sont les mêmes (favorise les points de liaison)	Les portions ne sont pas à des positions homologues La perspective n'est pas respectée	Pas de points de liaison Les points se placent autour d'un mauvais plan, sur un certain volume	Le fond n'est pas reconstitué. <b>Échec de la méthode.</b>
Test 4 : Même morceau bien placé	Rapide et simple à réaliser Les portions ajoutées sont les mêmes (favorise les points de liaison) Les positions sont homologues	La perspective n'est pas respectée	Points de liaison denses, au bon endroit Nuage de points occupant un volume cylindrique autour de la section ajoutée (semblent se concentrer autour d'un plan incliné incrusté dans le mur)	Le fond est mal reconstitué. <b>Échec de la méthode.</b>

Test 5 : Quatre coins bien placés	Les portions ajoutées sont homologues	Traitement lourd : calculs des coordonnées, pointage précis dans les images et déformations de la sélection nécessaires	Points de liaisons denses et bien placés Portion du mur bien replacée : bonne position, dans le plan, sans trous Démarcation des couleurs au niveau du raccord Nuage de point moins dense et sur une légère épaisseur au niveau du raccord	L'objet à supprimer n'apparaît plus. Le mur est bien reconstitué. <b>La méthode est validée.</b>
Test 6 : Quatre coins bien placés et bords estompés	Les portions ajoutées sont homologues La démarcation des couleurs au niveau du raccord est estompée	La texture compensant la démarcation au niveau du raccord est aléatoire : perte de points de liaison (bords non homologues)	Points de liaison nombreux (moins que le test précédent) Modèle 3D aussi bon que le précédent, avec une démarcation des couleurs beaucoup moins prononcée Pas de perte de points au niveau des bords du raccord dans le modèle 3D Toujours un nuage de point moins dense et sur une légère épaisseur au niveau du raccord	L'objet à supprimer n'apparaît plus. Le mur est bien reconstitué. Les couleurs sont bonnes. <b>La méthode est validée.</b> <b>Meilleure méthode testée.</b>
Test 7 : Quatre coins bien placés sans calcul	Recrée la perspective Sans calculs	Nécessité de points de repères sur le fond Le fond à ajouter doit être plan	Points de liaison bien placés, denses, sans interruption avec le reste du mur Nuage de points parfaitement reconstitué : même densité, même épaisseur (plan), même couleur, même plan que le reste du mur Pas d'interruption dans le nuage	L'objet à supprimer n'apparaît plus. Le mur est bien reconstitué. Les couleurs sont bonnes. <b>La méthode est validée.</b> <b>Meilleure méthode testée</b> (meilleure que le test précédent), mais présentant la contrainte des points de repères nécessaires dans le décor.

Les objets sur lesquels nous avons choisi de faire nos tests de suppression étaient directement contre l'arrière-plan (accrochés au mur). Notons que ce n'est pas une nécessité. Cela rend les traitements plus simples, dans la mesure où cela garantit que le fond à reconstruire sera homogène (pas de détails complexes partiellement masqués à reconstruire), quel que soit l'angle de vue.

### 3.3 Protocole et recommandations

#### Comment supprimer un objet présent dans une scène 3D ?

Les résultats des différents tests de suppression nous mènent à établir le protocole suivant.

Les premières étapes pour supprimer un objet sont similaires à celles permettant d'incruster un objet non issu d'une prise de vue photogrammétrique :

**1/** Prendre une prise de vue du décor dans lequel on souhaite supprimer l'objet.

**2/** Lancer les premiers traitements de mise en place sur cette prise de vue : orientation, calcul des paramètres de calibration.

**3/** Lancer la corrélation dense pour obtenir le nuage de points 3D de la scène. Ce nuage de points permettra par la suite la détermination de coordonnées de points terrain. En outre, le générer permet de vérifier, avant de se lancer dans les montages photo, que le lot d'images du décor se reconstitue bien et donc que la prise de vue est valide. Cela offre enfin la possibilité de qualifier les résultats par comparaison des modèles 3D obtenus avant et après suppression.

**4/** Récupérer les données nécessaires aux calculs par application de la formule d'image : les paramètres de calibration de l'appareil (dont les coefficients de distorsion), et pour chaque image, la matrice rotation et les coordonnées du sommet de prise de vue.

Nous commençons alors les étapes propres à la suppression d'objet :

**5/** Trouver dans la scène une portion de fond cohérente avec le reste du décor pour remplacer l'objet. Pour alléger les traitements, il est conseillé d'opter pour un polygone, le plus simple possible.

**6/** Déterminer les coordonnées terrain des points définissant le contour de la zone choisie qui remplacera l'objet (sommets du polygone par exemple), dans le repère local défini par MicMac lors de l'orientation relative des images. Pour cela, afficher le nuage de points (dans CloudCompare par exemple) et pointer et lire les coordonnées des points choisis.

Ces points forment un premier lot de points terrain.

**7/** Définir maintenant un second lot de points terrain : les positions souhaitées pour cette portion de décor, après copie et déplacement sur l'objet pour le masquer. Il s'agit donc de choisir les points sur lesquels chacun des points précédents (premier lot, définissant la forme de l'échantillon de décor) devra être déplacé sur le décor pour donner la scène finale (sans l'objet). En d'autres termes, il faut déterminer les coordonnées d'autant de points que choisis précédemment, et de même géométrie, de sorte qu'ils

entourent l'objet à supprimer (puisque la zone dont ils définissent les contours doit couvrir l'objet).

**8/** En appliquant la formule d'image sur toutes les coordonnées terrain déterminées, calculer les coordonnées image de tous les points, pour chaque image de la prise de vue de la scène. On pourra automatiser cette partie avec un script de calcul, écrit en Python par exemple.

**9/** Sous Photoshop® (ou autre logiciel de traitement d'image), sélectionner précisément dans chaque cliché la zone choisie, grâce aux coordonnées image du premier lot de points (définissant la forme de l'échantillon).

**10/** Pour chacune des images de la prise de vue, dupliquer et déplacer la sélection sur l'arrière-plan, en faisant coïncider chaque point définissant le contour de l'échantillon avec les coordonnées image calculées (deuxième lot de points choisis). Cette étape nécessite la torsion de l'échantillon d'image sélectionné (puisque'il y a un effet de perspective), que l'on gère par exemple dans Photoshop® avec l'outil de transformation manuelle *Torsion*.

**11 /** Lancer la reconstruction MicMac avec les photomontages.

## Contraintes

Le choix de l'arrière-plan de la photo au moment de la prise de vue (fond derrière l'objet) et de l'échantillon de décor, tiré de cet arrière-plan, est soumis à de nombreuses contraintes :

- L'arrière-plan doit être texturé pour accrocher des points homologues.
- L'arrière-plan derrière l'objet à supprimer doit être relativement simple : la partie cachée par l'objet doit être reproductible à partir d'autres éléments visibles du décor, quel que soit le point de vue.
- L'échantillon choisi et déplacé à la place de l'objet doit être cohérent avec le reste de l'arrière-plan en aspect, notamment en couleurs ; et ce quel que soit le point de vue.
- L'échantillon choisi doit être le même (mêmes coordonnées terrain) pour toutes les images : il doit être visible et sélectionnable sur chacune d'entre elles.
- L'échantillon doit pouvoir recouvrir l'objet quel que soit le point de vue (sans couvrir des détails autres que l'objet, qui apparaîtraient dans d'autres clichés de la prise de vue, et / ou que l'on souhaite conserver). Pour des arrière-plans plus complexes, il peut être nécessaire d'envisager l'utilisation de plusieurs échantillons,

qui doivent rester cohérents entre eux et avec le reste du décor selon le point de vue...

Le choix des points terrain doit par ailleurs être bien réfléchi :

- En ce qui concerne les points du premier lot, l'échantillon qu'ils délimitent doit répondre aux critères précédents. Par ailleurs, moins il y a de points retenus, plus le traitement est allégé, mais moins l'échantillon peut avoir une géométrie finement adaptée aux forme et taille de l'objet à supprimer.
- Les points du deuxième lot (position de l'échantillon lorsqu'il masque l'objet) doivent être en des positions stratégiques et en nombre suffisant pour permettre de recréer la perspective (par exemple, 4 points pour les quatre sommets d'un quadrilatère si l'échantillon est plan ; 6 si l'échantillon est un quadrilatère formant un angle (quatre pour les sommets, deux pour marquer l'angle)...).
- Il doit en outre y avoir autant de points (et de même géométrie) dans les deux lots : les contraintes sur l'un des lots imposent le choix de points, qui doivent être pris en compte lorsque l'autre lot est constitué.

## 4 Tolérance de MicMac

On cherche à évaluer la tolérance du placement de l'objet dans la photographie lors de la reconstitution 3D avec la commande C3DC MicMac.

Pour cela, on déplace un objet d'un cliché de sa position réelle, découpé grâce à Photoshop®, dans une prise de vue photogrammétrique.

### 4.1 Etude de la translation

On applique un décalage constant de manière horizontale à un objet de l'image et on étudie son impact sur la reconstitution du modèle 3D.

Par dichotomie, on teste par essais successifs des décalages pour aboutir à une valeur seuil.

#### Translation constante

En translation constante (*ie.* On applique à l'objet sur chaque cliché de la prise de vue la même translation en pixels sur l'image), la reconstruction s'effectue correctement<sup>1</sup> jusqu'à un décalage de l'objet depuis sa position d'origine de **20 pixels**.



Figure IV.1 : Prise de vue dont on a décalé l'objet de 20 px de sa position initiale

---

<sup>1</sup> La question se pose de savoir quand est-ce que l'on peut qualifier une reconstruction de « correcte ». Il est en effet difficile d'élaborer des critères d'évaluation objectifs tels que pourraient l'être des critères statistiques par exemple. On se fie principalement à notre perception visuelle pour valider ou non une reconstruction.

Il est notable de constater que là où on a laissé du blanc en décalant l'objet, les reconstitutions ont reconstitué du blanc de la photo comme du blanc du monde.

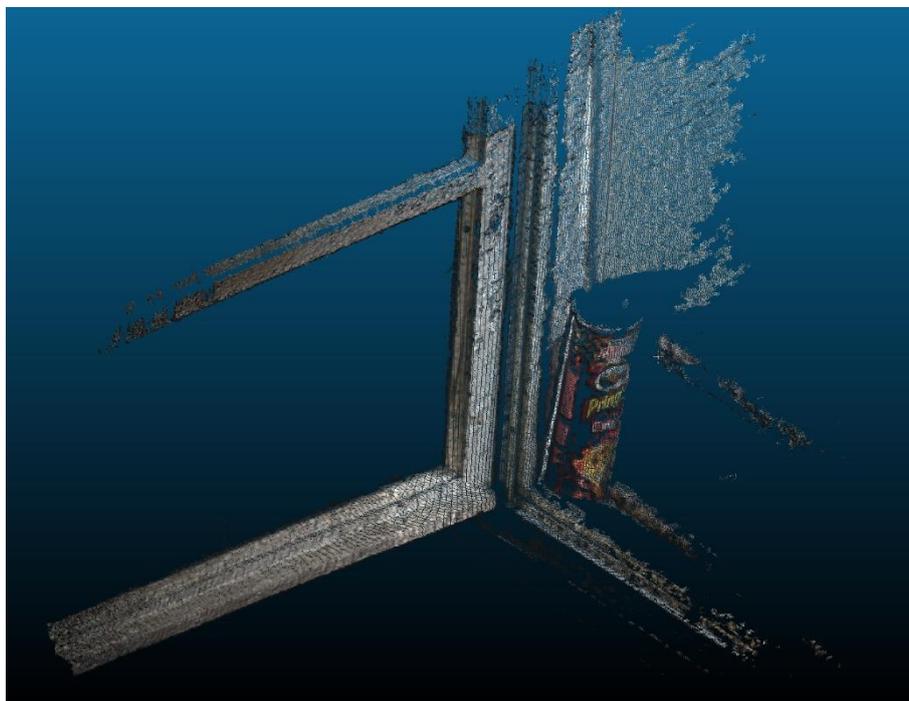


Figure IV.2 : Reconstitution C3DC MicMac de la prise de vue avec décalage de 20 px

Le décalage étant constant, l'objet du monde se voit être décalé toujours de cette même position dans le modèle 3D.

## Translations multiples

On décale l'objet sur les photos de valeurs différentes, puis on effectue la reconstitution de la prise de vue.

Lorsque les valeurs de décalage varient **entre 0 et 20 pixels**, le modèle se reconstitue. Avec des décalages supérieurs, MicMac ne parvient pas à réaliser la reconstitution et renvoie un message d'erreur.

## Commentaires

Les translations multiples se rapprochent du comportement que l'on a lors de l'acquisition, car le recalage de l'objet entre la prise de vue de l'objet et celle du décor varie "aléatoirement", ce qui n'est pas traduit par un décalage constant.

## 4.2 Etude de la rotation

Le test en translation ne saurait traduire à lui-seul les variations de l'objet d'une prise de vue d'une scène à une autre. Si le trépied peut être décalé par rapport à la position réelle qu'il devrait avoir, il existe aussi une incertitude sur le degré de liberté rotatif du trépied.

On applique maintenant une rotation constante à un objet de l'image, et on étudie l'impact de celle-ci sur la reconstitution du modèle 3D.

On applique la même démarche que celle pour la recherche de la tolérance en translation, par dichotomie pour obtenir une valeur seuil de fonctionnement.

### Rotation constante

Lorsque l'on applique une rotation constante à l'objet, la reconstruction s'effectue correctement jusqu'à un décalage de l'objet de sa position d'origine de  $20^\circ$ .



Figure IV.3 : Prise de vue dont on a appliqué une rotation de  $20^\circ$  à l'objet depuis sa position initiale

Ici encore, une partie du blanc de l'image est reconstituée comme du blanc du monde qui n'existe pas.

## Rotations multiples

On applique à l'objet une rotation différente sur chaque image, puis on effectue une reconstitution de la prise de vue.

Avec des rotations multiples dont l'une d'elles est supérieure à  $5^\circ$ , MicMac ne parvient pas à trouver de points de liaisons, et un trou est reconstitué à la place de la boîte (cf. FIGURE IV.3) ; avec des variations angulaires entre  $2$  et  $5^\circ$ , la boîte n'est pas entièrement reconstituée ; avec des variations **en deçà de  $2^\circ$** , la reconstitution est acceptable.

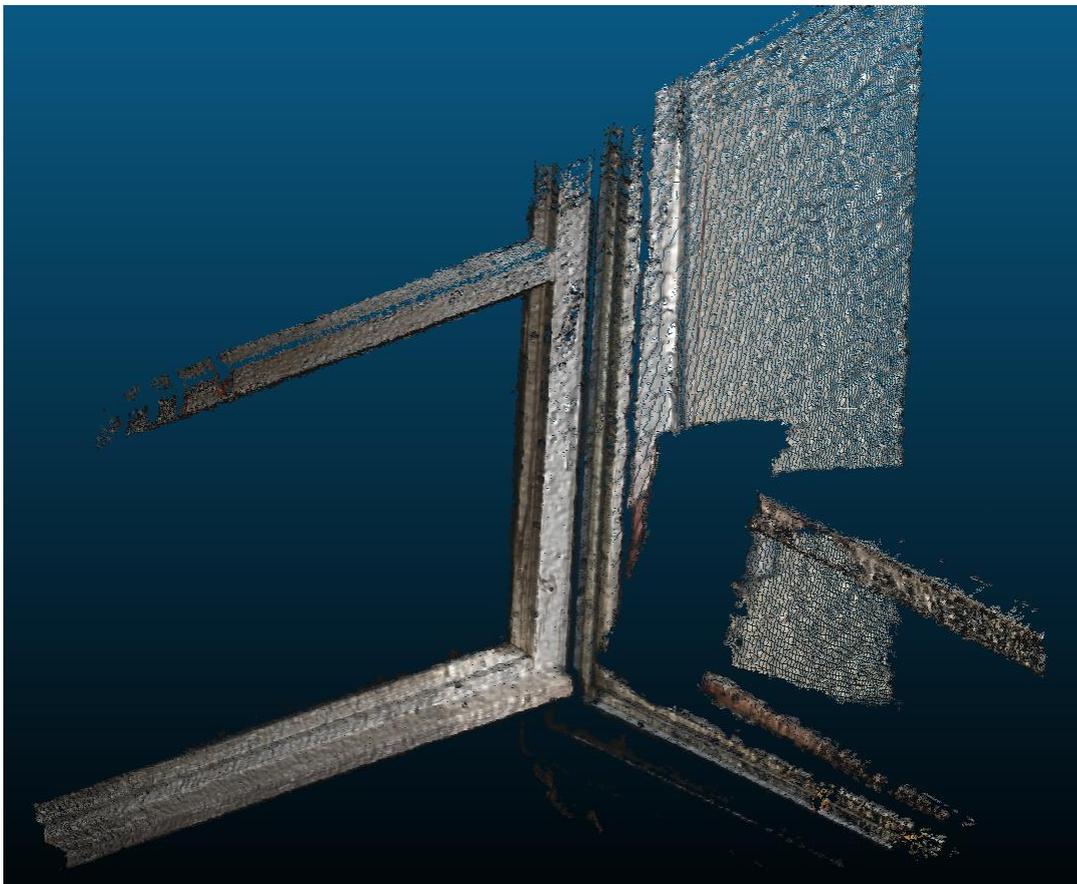


FIGURE IV.3 : Reconstitution C3DC MicMac de la prise de vue avec des rotations de l'objet variant entre  $0$  et  $10^\circ$

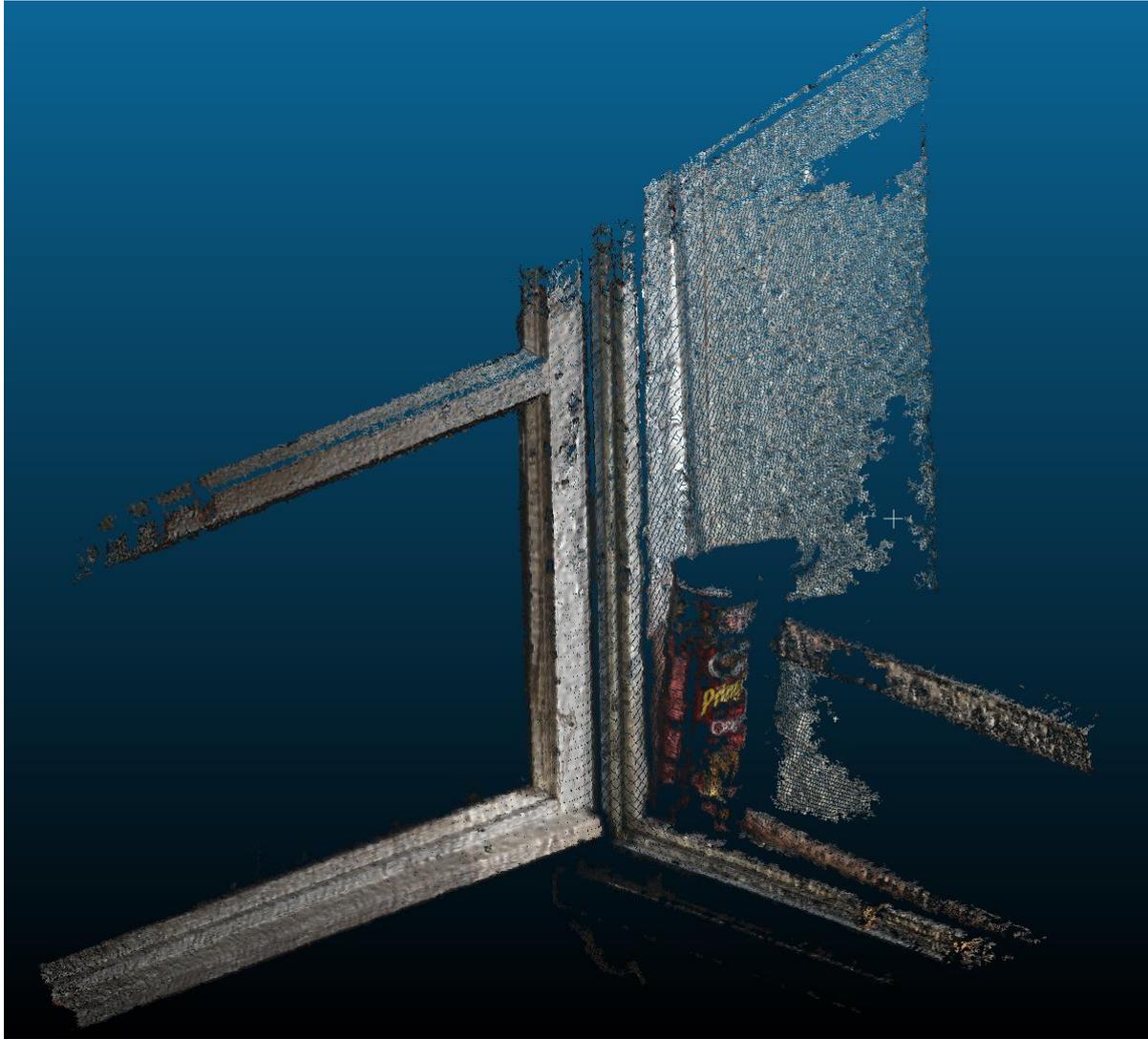


FIGURE IV.4 : Reconstitution C3DC MicMac de la prise de vue avec des rotations de l'objet variant entre 0 et 2°

### 4.3 Synthèse

Le tableau suivant récapitule les valeurs de tolérance de décalage :

	<b>En translation</b>	<b>En rotation</b>
<b>Tolérance</b>	20 pixels	2°

On note que la valeur de translation et en rotation en pixel sont significatives dans nos recollages. Une vingtaine de pixels de décalage est rapidement atteignable dans le recollage d'un objet dans une image, avec un léger décalage de l'angle de prise de vue par rapport à la scène initiale.

Dans une prise de vue photogrammétrique, les deux types d'erreurs se combinent pour un cliché. Les actions à l'origine de ces types d'erreurs sont :

- L'imprécision sur le placement du trépied : l'enjeu du sujet est de reproduire de manière identique la même prise de vue dans deux endroits distincts. On se dote de matériel adéquat pour réaliser la prise de vue, qui contient malgré tout un écart-type intrinsèque sur la précision de mesure.
- Le mouvement du socle de l'appareil photo : le choc entre deux poses de trépied peut faire bouger, s'il est mal vissé, le socle de quelques dixièmes de millimètres. Accumulées, ces erreurs peuvent devenir significatives.
- Les erreurs opérateur, qui restent inévitables malgré toute l'attention et la minutie apportées à la qualité et au soin de la prise de vue.

## 4.4 Etude de petits mouvements de l'appareil photo

### Description

On étudie l'impact de petits mouvements de l'appareil sur une reconstruction 3D avec la commande C3DC MicMac, afin d'évaluer un degré de tolérance de la reconstruction.



FIGURE IV.5 : Prise de vue de la scène étudiée

Pour cela, on effectue une prise de vue de quelques photos de la scène depuis le même endroit (en l'occurrence ici, « en croix », en prenant une photo centrale, et 4 photos autour de celle-ci), en bougeant « légèrement » l'appareil photo (il est difficile d'évaluer le mouvement sur le terrain, on pourra le déterminer en post-traitement).

On lance ensuite un processus de reconstruction avec MicMac (orientation relative des images, recherche de points homologues, corrélation dense), et on commente le résultat.

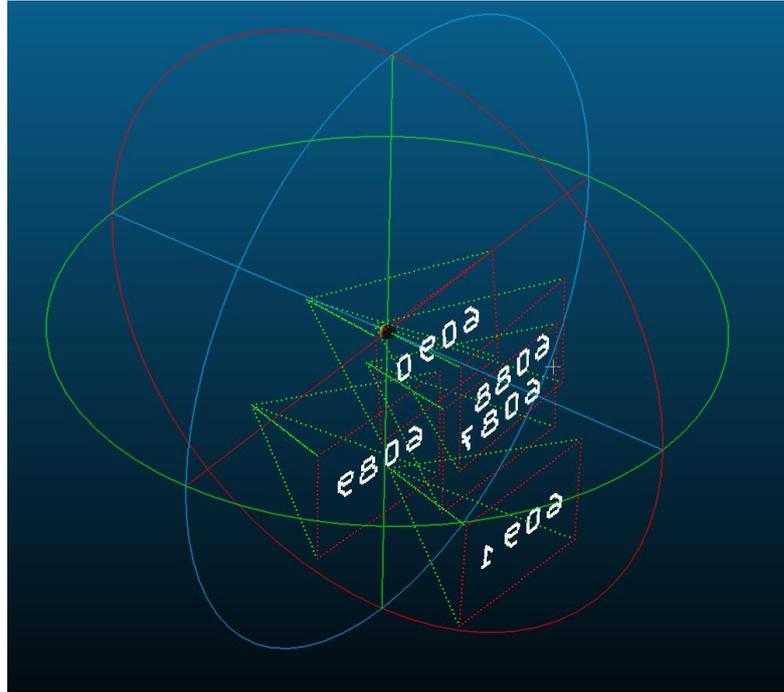


FIGURE IV.6 : Reconstitution des sommets de prise de vue de la scénographie

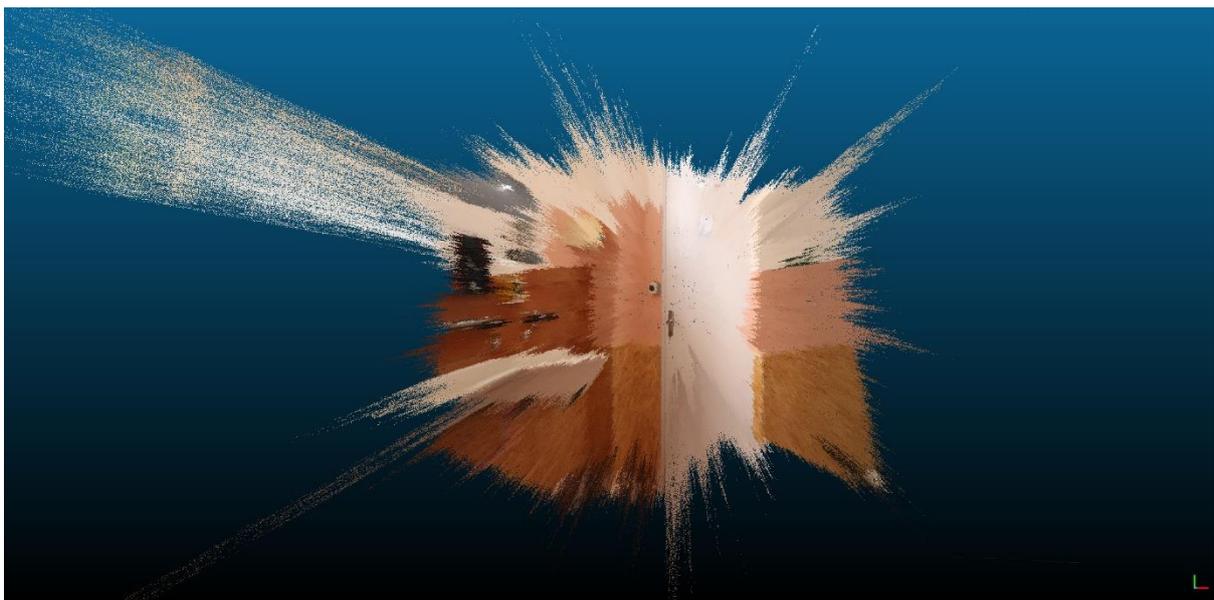


FIGURE IV.7 : Reconstitution C3DC MicMac de la scène

## Commentaires

Il est notable de constater que la reconstitution 3D ne fonctionne pas. Dans le plan de l'image maîtresse, on pourra noter l'alignement des points de la corrélation dense ; sur les autres plans les points sont diffusés dans toutes les directions suivant des axes incohérents avec la prise de vue.

L'évaluation du mouvement peut se faire en prenant une distance dans le repère arbitraire choisi par MicMac, donnant ainsi une échelle pour passer dans le repère absolu (on effectue ainsi une sorte de « bascule »). On détermine sur le terrain une distance réelle (on choisit ici l'un des côtés de l'avancée du mur à côté de la porte), et on applique une règle de 3 pour déterminer la distance entre les sommets de prise de vue dont on connaît les coordonnées grâce à l'orientation relative des images.

Ces calculs nous mènent à évaluer le déplacement de sommet de prise de vue de d'environ 2,5 cm pour chaque cliché latéral depuis le cliché central, et d'au maximum 4 cm entre 2 clichés latéraux.

Ce test nous amène donc à remarquer que des mouvements centimétriques sont significatifs dans la reconstruction du modèle. On peut donc conclure que l'on doit avoir une **précision de l'ordre du centimètre** pour aboutir à une reconstruction fidèle de la scène.

## 5 Matériel utilisé

Afin de faciliter les prises de vue, nous avons imaginé et réalisé des dispositifs répondant aux contraintes que les résultats des expériences nous ont permis de dégager.

Il s'agit de rails, destinés à guider le déplacement de l'appareil photo au cours de la prise de vue. Nous avons construit deux formes de rails : rectiligne et circulaire, pour pouvoir être adapté à la prise de vue souhaitée.

### 5.1 Description

#### Usage

Ces deux rails ont été conçus pour faire office de « marquage au sol transportable », ce qui permet de positionner l'appareil photo de la même manière entre plusieurs prises de vue réalisées en des endroits différents.

#### Aspect

Le rail rectiligne est semblable à une échelle : il est composé de deux bandes parallèles, d'un peu plus de 1.60m de long, destinées à recevoir deux des pieds du trépied (la position du troisième étant imposée par celle des deux autres pieds, tant que l'on ne change pas l'écartement du trépied). Perpendiculairement, neuf bandes parallèles entre elles (barreaux de l'échelle), disposées tous les 20 cm, servent à la fois à maintenir les deux bandes parallèles, et à indiquer les positions successives de l'appareil photo.

Le rail circulaire, de 1.50m de rayon, est en fait composé de tronçons rectilignes successifs, formant un léger angle entre eux (ce qui assure la fermeture du cercle). En déplaçant le trépied de l'appareil d'une intersection de ces tronçons à la suivante, on parcourt  $10^\circ$  sur le cercle.

Les valeurs 20 cm et  $10^\circ$  assurent un bon recouvrement à nos distances de travail (1.50m de l'objet).



FIGURE V.1 : Photo du rail placé au sol pour une prise de vue intérieure



FIGURE V.2 : Rail circulaire utilisé lors d'une prise de vue en extérieur

## Matériau

Les rails ont été réalisés en scotch : c'est un matériau que l'on peut facilement découper, agencer, et qui est disponible (pas cher). Sa simplicité à être manipulé nous a permis de construire les rails exactement aux dimensions désirées, en adéquation avec la taille du trépied que nous utilisons. Il est par ailleurs très léger et déformable, ce qui le rend facilement transportable. On peut enfin écrire dessus.

Pour construire chaque tronçon, nous avons découpé de longues bandes de scotch, que nous avons pliées en deux pour recoller le scotch sur lui-même, lui offrant plus de rigidité et l'empêchant d'accrocher le sol (nous voulons transporter notre rail, sans le déformer ; le décoller du sol entre deux prises ne le permettrait pas).

## 5.2 Mode opératoire

### Positionnement du rail par rapport à l'objet

Le rail doit être positionné de manière équivalente entre la prise de vue « objet » et la prise de vue « décor », par rapport à l'objet à incruster pour la première et au lieu de l'incrustation pour la seconde.

La méthode pour obtenir un placement équivalent est la suivante :

Il faut tout d'abord placer l'objet. Il est nécessaire d'anticiper et laisser la place de se déplacer autour de l'objet, pour permettre la prise de vue souhaitée. Il faut alors marquer précisément l'emplacement de l'objet au sol. C'est cet emplacement qui servira de référence pour les mesures de distance. Ensuite il faut repérer (voire matérialiser) des points caractéristiques de l'objet à incruster (des coins dans notre exemple).

Il faut ensuite poser le rail, à la distance souhaitée de l'objet. Veiller à tendre la structure. Pour le cercle, il faut placer le centre du cercle et fixer les rayons apparents, toujours en tendant la structure.

On mesure alors certaines distances caractéristiques (au moins 3 pour permettre un repositionnement sans ambiguïté), entre les points caractéristiques de l'objet et le rail (il est conseillé de marquer les points mesurés sur le rail, avec un scotch ou au feutre). Ces distances permettent de replacer le rail de manière équivalente sur le lieu de prise de l'objet et celui de prise du décor.

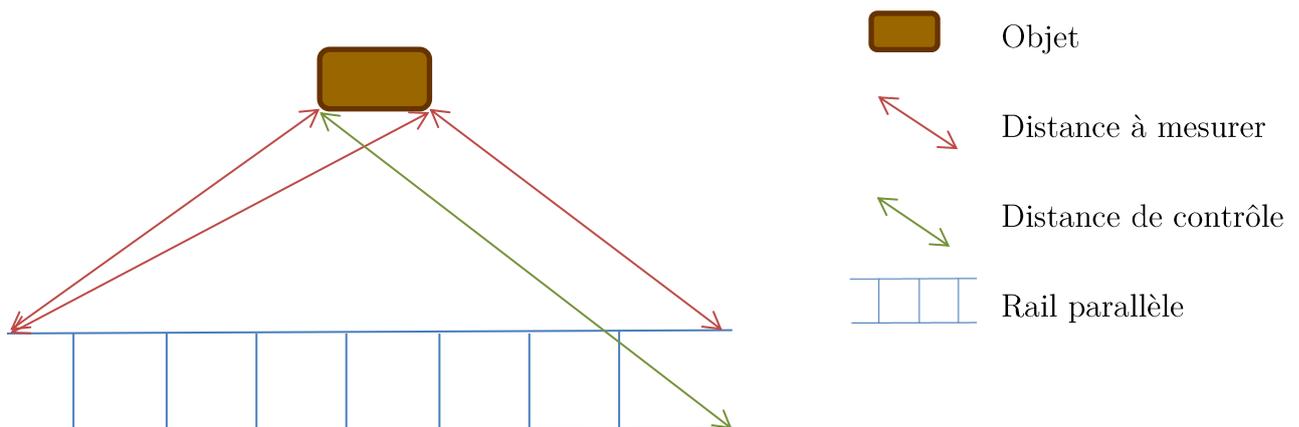


FIGURE V.3 : Exemple de distances prises sur le rail rectiligne.

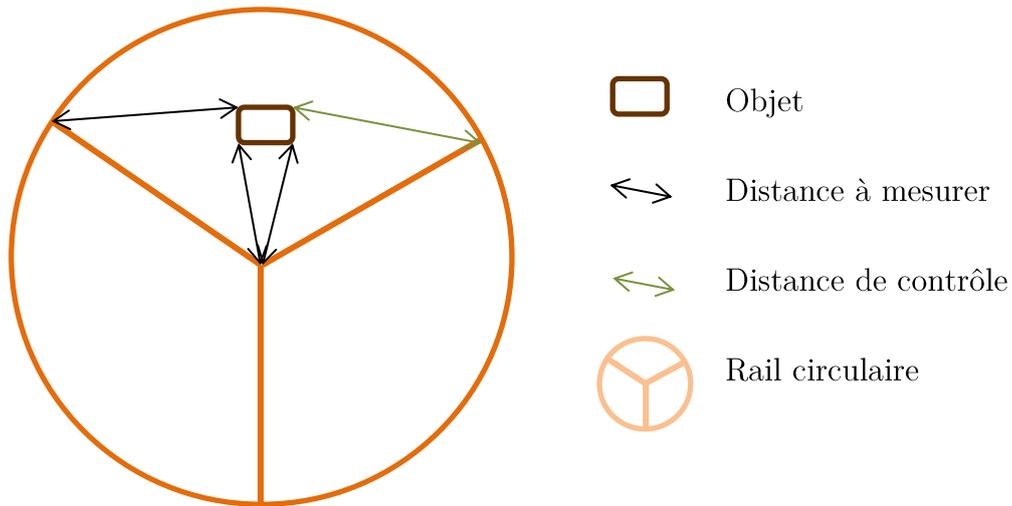


FIGURE V.4 : Sur le rail circulaire, on mesure des distances entre le centre du rail, le cercle, et les éléments caractéristiques de l'objet.

Sur le lieu de l'incrustation, on replace alors l'objet à incruster. On marque sa position au sol, et on retire l'objet. Le marquage au sol permet de replacer le rail par rapport à l'emplacement attendu de l'objet, de manière à ce que les distances mesurées soient les mêmes dans les deux prises de vue.

Les marquages au sol pourront par ailleurs servir ensuite, au moment du montage Photoshop®, à replacer l'objet au bon endroit, en cas de petits mouvements de l'appareil entre les deux prises de vues. Cette étape favorise la reconstruction 3D.

## Déroulement d'une prise de vue

Une fois le rail correctement positionné, on peut commencer la prise de vue, qui se déroulera de la manière suivante :

Rail rectiligne	Rail circulaire
Positionner deux pieds du trépied sur chacune des longueurs de l'échelle, en s'aidant des barreaux	Positionner deux pieds du trépied sur le rail, dont un sur une intersection des segments composant le cercle, marquant $10^\circ$
Veiller à ce que le rail ne se déforme pas, en vérifiant notamment le parallélisme	A l'aide d'une ficelle de la longueur du rayon du cercle, vérifier pour chacun des deux pieds que la distance au centre est bien celle d'un rayon
Marquer l'emplacement précis des pieds sur le scotch	
Orienter l'objectif parallèlement à la face que l'on souhaite photographier	Orienter l'objectif vers le centre du cercle
Bloquer les mécanismes qui servent à l'orientation de l'appareil	
Prendre la photo	
Faire glisser le trépied sur le rail jusqu'à la prochaine position souhaitée	

Lors de la première prise de vue, il faut bien veiller à marquer les positions successives de l'appareil sur le rail. Ces positions serviront lors de la seconde prise de vue à replacer le trépied de l'appareil précisément au même endroit que pour la première.

L'écartement du trépied et les mécanismes orientant l'appareil sur son trépied sont ajustés avant la première photo, et ne doivent plus bouger, pour assurer de réaliser la seconde prise de vue avec les mêmes réglages.

## 5.3 Qualification des prototypes

### Avantages

- Gain de temps
- Gain en précision

L'avantage premier est un très grand gain de temps. Sans les rails, les marquages sont à recommencer entièrement d'un lieu à l'autre, après avoir pris toutes les mesures de distances nécessaires : mesures pour positionner l'objet, la première prise de vue, la direction des suivantes par rapport à l'objet, la distance séparant deux sommets de prise de vue, la position des pieds du trépied pour assurer la même orientation de l'appareil photo... Pour pouvoir être déterminée, chaque position nécessite par ailleurs la mesure de plusieurs distances. L'utilisation du rail permet de réduire drastiquement le nombre de mesures à prendre ; et, au vu du nombre de mesures nécessaires en l'absence de rail lors de la première prise de vue, et à reproduire lors de la deuxième, le gain de temps est considérable.

Le second avantage majeur est un gain de précision. Toutes les mesures à prendre en l'absence de rail sont autant de sources d'erreur ; qui par ailleurs sont susceptibles de se cumuler. S'il reste à placer le rail correctement (ce qui revient à déterminer la position du premier sommet de prise de vue, et la direction du déplacement de l'appareil entre deux clichés), celui-ci garantit au moins une même cohérence au long de la prise de vue dans les deux phases (avec et sans objet) : les sommets de prise de vue seront séparés d'une même distance, et le trépied sera orienté dans la même direction dans les deux phases.

### Contraintes et inconvénients

- Le sol doit être plat (ou mêmes déformations entre les lieux objet et décor)
- Veiller à bien tendre les bandes de scotch
- On utilise du scotch pour fixer le rail ce qui le laisse sensible aux déformations au cours des prises de vue : compliqué à mettre en place, des mesures de contrôle sont à faire régulièrement

## **Limites**

- La souplesse du rail entraîne des déformations, causées d'une perte de précision
- Manque de précision du placement du rail

Les déformations possibles du rail, à son installation et pendant la prise de vue, due à son caractère trop souple, entraînent une perte de précision. Toujours tendre le rail permet de diminuer les écarts en s'approchant au mieux d'une configuration unique entre les deux prises de vue, mais la précision ne descend pas avec certitude en-dessous du centimètre. Or, nos tests ont mis en évidence que le centimètre était précisément l'ordre de grandeur de la précision requise pour permettre une bonne reconstruction 3D d'une scène à l'issue d'une incrustation.

Le placement du rail est de même d'une précision centimétrique. En effet, nous prenions toujours sur le terrain plus de mesures que nécessaire pour la détermination du placement, ce qui permet un contrôle. Or, nous avons pu observer que la mesure de contrôle ne pouvait valider avec certitude le repositionnement du rail à une précision en-dessous du centimètre. Cela peut être dû à la non linéarité des lignes du rail : le scotch se détend, et les bords ne sont pas rectilignes, car le scotch a parfois été plissé lorsqu'il a été replié sur lui-même. Encore une fois, le centimètre correspond à la tolérance de notre travail. Un mauvais placement du rail propage par ailleurs l'erreur sur l'ensemble de la prise de vue, puisque chaque sommet de prise de vue se verra légèrement décalé.

## **Améliorations**

Principalement :

- Structure rigide, mais toujours transportable
- Positionnement précis du trépied
- Déplacement aisé du trépied le long du rail

Nous avons rédigé un cahier des charges détaillé d'une structure circulaire qui serait adaptée à nos travaux, répondant mieux aux contraintes que nous rencontrons. Ce cahier des charges figure en Annexe.

Nous avons cherché dans l'existant quels outils pourraient se rapprocher de notre prototype idéal. Nos recherches nous ont mené à nous tourner vers l'industrie du cinéma, où l'incrustation est courante et où les plans de travelings sont des prises maîtrisées.

Le rail construit en scotch possède une adaptation rigide utilisée pour les tournages de cinéma, appelée rail *Dolly*, dont le procédé existe aussi bien en rectiligne qu'en circulaire.



FIGURE V.5 : Exemple de rail *Dolly* circulaire sur un plateau de tournage

## Conclusion

L'objectif du projet était d'établir un protocole d'acquisition afin de réaliser une incrustation photogrammétrique d'un objet étranger à une scène, et d'en effectuer une reconstitution 3D. Les nombreux tests menés nous ont permis de converger, par essais-erreurs, vers une démarche fiable et exploitable.

Nous laissons un protocole d'acquisition dans la mesure de nos moyens, ainsi qu'un protocole idéal avec du matériel optimisé. Nous espérons que s'il venait à y avoir de futurs opérateurs sur le même type d'opérations, les tests menés et les conclusions dressées leur permettraient de réaliser une incrustation de manière idéale.

Les perspectives suite à ce projet sont encore grandes : une bascule pourra être effectuée afin de mettre à l'échelle notre reconstitution et ainsi effectuer des tests sur la conformité du nuage. Nous pourrions évaluer par des critères plus physiques le respect des angles de prises de vues, ou l'absence de distorsion dans la reconstitution (par la mesure de distances dans un repère connu par exemple).

Cette étude n'a pas exploré les processus de substitution d'un objet par un autre. Celle-ci se ramène en fait à deux grands cas pratiques. Le premier concerne le cas où l'objet qui remplace l'autre est le plus grand, et son image couvre l'objet à remplacer quel que soit l'angle de vue. Nous nous ramenons ici alors à un simple ajout : on incruste l'objet par lequel on veut substituer l'autre, à la position occupée par l'objet à remplacer. Le second cas, plus complexe, regroupe toutes les autres configurations possibles : l'objet destiné à remplacer l'autre est plus petit, ou de même taille mais de géométrie différente, et son image ne masque pas celle de l'autre objet dans tous les points de vue (voire aucun). Il faut donc tout d'abord masquer le premier objet, ce qui revient à une suppression ; puis incruster le second, ce qui nous ramène à un ajout. Nous remarquons alors que si la substitution d'objets n'a pas été traitée en tant que telle dans ce projet, elle se ramène en fait précisément à nos cas d'étude, et les démarches que nous avons établies sont adaptées pour la mener à bien.

Les protocoles que nous proposons permettent une meilleure maîtrise des procédés photogrammétriques, au service d'applications variées : conservation du patrimoine, reconstitutions historiques, modification du couvert végétal, etc. Les méthodes explorées, en complément d'autres techniques d'acquisition et de traitement d'images, offrent de nouvelles possibilités de reconstitution 3D du monde.

## Remerciements

Nous remercions tout d'abord et avant tout notre tuteur de stage, Jean-François Hangouët, pour ses conseils éclairés et son soutien dans le déroulement de notre projet.

Nous remercions également Marc Pierrot-Deseilligny, concepteur de MicMac, pour son aide précieuse et ses réponses rapides à nos interrogations.

Enfin, nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.