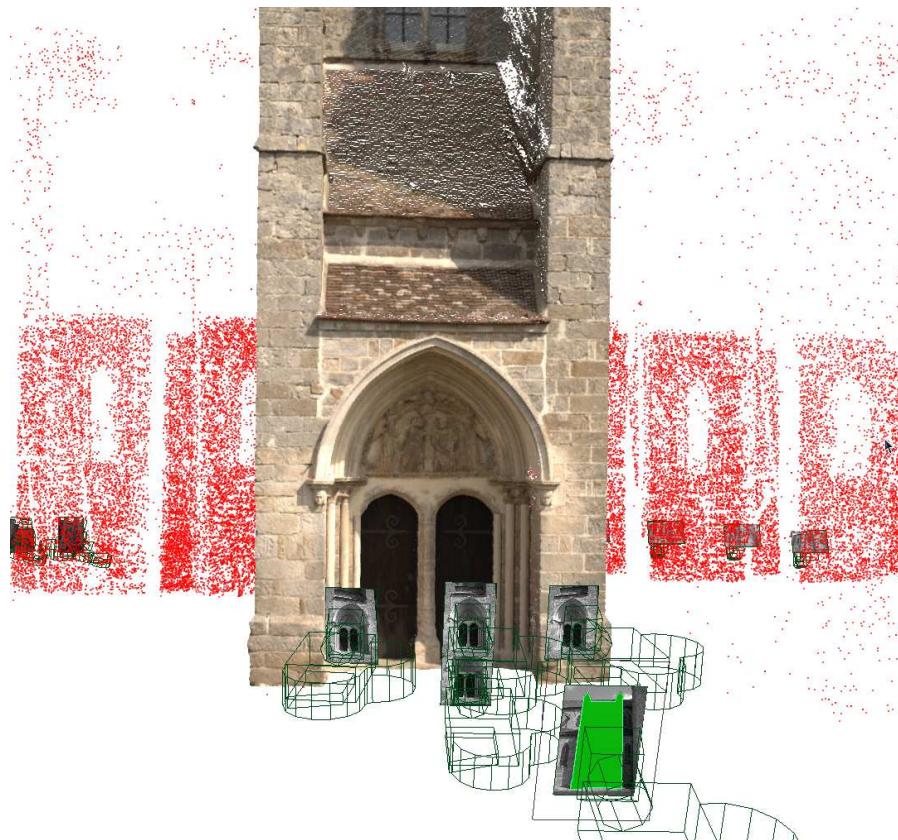


Rapport de Travail de Fin d'Étude
Cycle des Ingénieurs diplômés de l'ENSG 3^{ème} année (IT3)
Mastère Photogrammétrie, Positionnement et Mesure de Déformations

**GENERATION AUTOMATIQUE DE NUAGES DE
POINTS D'EDIFICES A PARTIR DE
PHOTOGRAPHIES**



Aymeric GODET

Le mardi 28 septembre 2010

✓ Non confidentiel Confidential IGN Confidential Industrie

Jury

Président du jury :

Michel KASSER, directeur de l'ENSG

Commanditaire :

Laboratoire du MAP GAMSAU

ENSA-Marseille,
184, avenue de Luminy,
132188 Marseille cedex 9

Encadrement de stage :

Livio DE LUCA, MAP GAMSAU, Maître de stage
Raphaële HENO, ENSG/IGN, Professeur référent
Marc PIERROT DESEILLIGNY, IGN/MATIS, Chercheur

Responsable pédagogique du cycle IT3 :

Serge BOTTON, Département Positionnement Terrestre et Spatial

© ENSG

Stage Pluridisciplinaire du 26 avril au 24 septembre 2010

Diffusion Web : Internet Intranet Polytechnicum Intranet ENSG

Situation du document :

Rapport de travail de fin d'étude présenté en fin de 3^{ème} année du cycle des Ingénieurs

Nombre de pages : 51 dont 1 d'annexes

Système hôte : Word 2003

MODIFICATIONS

EDITION	REVISION	DATE	PAGES MODIFIEES
1	0	15/08/10	Création
	1	10/09/10	Modification

RESUME

Le stage propose de développer une interface permettant la génération automatique de nuage de points d'édifices à partir de relevé photographique et de calcul de corrélation automatique d'images. Les outils utilisés ont été développés par le laboratoire MATIS de l'IGN. Ces logiciels contiennent l'ensemble des modules nécessaires à la modélisation 3D à partir de photos.

Ces outils sont aujourd'hui opérationnels du point de vue algorithmique et ont été validés par le MATIS sur le relevé 3D d'un ensemble assez varié de scènes architecturales. Cependant, ils sont d'un usage assez complexe et ne permettent pas une exploitation par des utilisateurs non spécialisés. Le stage a donc pour but de développer une interface, permettant à des utilisateurs ayant des bonnes notions de photogrammétrie, d'utiliser l'ensemble de ces outils pour générer des modèles 3D à partir de relevé photographique.

Mots clés :

Architecture, Patrimoine, Relevé, Photogrammétrie, Nuage de points, Corrélation d'images

ABSTRACT

The architecture 3D modeling process is one of the main researches of the MAP GAMSAU laboratory. In this context, the laboratory has proposed an internship to establish a complete photogrammetric process and integrate it to NUBES Forma, a MAP modeling software.

The objective of this chain is to produce 3D point of clouds from dense correlation computation images. The main photogrammetric tools used are developed by the IGN MATIS research laboratory.

Moreover a specific protocol has to be determined to take good images on the field as possible for treatments with fewer problems at the office.

Key words:

Architecture, Heritage, Survey, Photogrammetry, Points of cloud, Correlation of images

REMERCIMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon maître de stage M. Livio DE LUCA et M. Marc PIERROT DESEILLIGNY pour leur encadrement et leur soutien si précieux durant toute la durée du TFE. Je souhaite également remercier MM. Michel FLORENZANO et Michel BERTHELOT, respectivement directeur et directeur adjoint du laboratoire, pour leur accueil au sein du MAP et qui on su organiser au mieux la logistique des différentes missions au cours du stage. Je voudrais remercier mon professeur référent Mme Raphaële HENO pour ses conseils et pour m'avoir présenté ce laboratoire.

J'adresse également mes remerciements à Pascal BENISTANT, ingénieur système et réseau du laboratoire, pour son aide sur des questions informatiques.

J'ai enfin une pensée pour mes camarades du laboratoire pour leur bonne humeur et leur chaleureux accueil : Julie, Noémie, Céline, Aurélie, Chiara, Anna, Julien, Nassim ,Romain et Nicolas.

SOMMAIRE

Introduction	9
I. Présentation du laboratoire et du stage	10
1. Le laboratoire	10
2. Le projet Nubes	10
3. Les objectifs du stage	11
II. Présentation des outils utilisés	12
1. Le système d'exploitation.....	12
2. MAYA.....	12
3. Qt Creator	13
4. ImageMagick	13
5. Les outils du MATIS	14
a) Présentation de la chaîne PAM	14
b) PASTIS	15
c) APERO.....	17
d) MICMAC	19
e) Les librairies C++ associées	21
III. Rédaction du Protocole d'acquisition	22
1. Traitements de sites	23
a) L'église de Rampillon	23
b) L'église de Fontains	24
c) La Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon	25
d) La Chapelle Impériale d'Ajaccio	26
e) Corbeaux et chapiteaux de Saint Michel de Cuxa.....	27
f) Objets d'art du musée Rodin.....	28
2. Le protocole	29
a) Condition du terrain	29
b) Paramétrage de la caméra	29
c) Choix d'un site de calibration:.....	30
d) Acquisition globale du site	30
e) Acquisition d'un site de corrélation	31
f) Type de Matériaux pour la corrélation	31
IV. PhotoCloud	32
1. Photocloud et les processus	32
a) Communication de Maya vers des processus extérieurs	33
b) Communication des processus extérieurs vers MAYA.....	34
2. NUBES Forma	35
3. Traitement des images	36
a) Prétraitement.....	36
b) Détection des points SIFT et calcul des homologues.....	37
4. Calculs des calibrations et des aérotriangulations	38
a) Stratégie générale des calculs	38
b) Le fichier de paramètre	39
c) Les différents cas de chantier	40
d) Contrôle des calculs et de l'avancement	40
5. Exportations des relèvements et des points SIFT3D	42
6. La corrélation dense	43
a) Présentation de l'interface.....	43
b) Programmation de l'IHM.....	44
c) Pilotage de MicMac	45
d) Contrôle du calcul.....	45
e) Contrôle de l'avancement	46

7.	Performance de PhotoCloud :	46
a)	Les résidus	46
b)	Espace mémoire	46
c)	Temps de calculs et de chargements.....	47
8.	Exemple de modélisation à partir des résultats de PhotoCloud.....	48
V.	Conclusion et perspectives.....	49
VI.	Bibliographie	50
VII.	Annexes :.....	51
1.	Rapport d'un premier utilisateur.....	51
2.	Details de prise de vue sur les chantiers du stage.....	51
3.	Documentation sur le paramétrage de la chaîne PAM	51
4.	Guide Programmeur	51
5.	Codes Sources	51

TABLE DES ILLUSTRATIONS

fig. 1	Interface de Maya	12
fig. 2	Schéma de la chaîne PAM	14
fig. 3	Espace d'échelle des images	15
fig. 4	Zone de l'extrema	15
fig. 5	Histogramme des gradients par zone d'orientation	16
fig. 6	Principe de l'appariement SIFT	16
fig. 7	Points caractéristiques de la caméra	17
fig. 8	Principe du masque dans MicMac	19
fig. 9	Zone de recherche de MicMac	20
fig. 10	Ombrages de surface à différents niveaux de la pyramide	21
fig. 11	Boucle d'apprentissage	22
fig. 12	Calendrier des activités du stage	22
fig. 13	Processus et système d'exploitation	32
fig. 14	Liste de processus sous Fedora	32
fig. 15	Mécanismes inter-processus en script MEL	33
fig. 16	Logigramme d'analyse d'avancement d'un processus	34
fig. 17	Intégration de PhotoCloud dans NUBES Forma	35
fig. 18	Structuration type d'un projet NUBES avec PhotoCloud	35
fig. 19	Avancement des prétraitements	36
fig. 20	Fenêtre des paramètres de PASTIS	37
fig. 21	Avancement de la mise en correspondance	37
fig. 22	IHM de la gestion du chantier pour APERO	38
fig. 23	Exemple de séquence d'utilisation d'APERO par PhotoCloud	39
fig. 24	Avancement des calculs d'APER0	40
fig. 25	Analyse de la calibration	41
fig. 26	Exemple de journal	41
fig. 27	Capture d'écran de Maya après l'exportation des résultats d'APER0	42
fig. 28	Principe du fonctionnement de SIFT3D	43
fig. 29	Interface des sites de corrélation de PhotoCloud	43
fig. 30	Saisie d'un masque de corrélation	44
fig. 31	Les objets de Maya pour la saisie d'un masque	44
fig. 32	Surface calculée sur les 6 étages de la pyramide	45
fig. 33	Images de contrôle de MicMac	45
fig. 34	Extraction de profils	48
fig. 35	Génération de volumes	48
fig. 36	Extraction des textures	48

INTRODUCTION

Ce rapport est la synthèse des travaux réalisés lors du stage de fin de d'étude au sein du laboratoire MAP GAMSAU (CNRS/MCC).

Il décrit dans une première partie le contexte du travail avec la présentation du laboratoire, les objectifs du stage ainsi que les outils qui ont été utilisés. Une approche un peu plus approfondie est apportée aux logiciels photogrammétriques utilisés.

La seconde partie présente les différents chantiers qui ont servi de cas d'étude pour l'élaboration du protocole d'acquisition et le développement du logiciel de traitement PhotoCloud.

Dans un dernier chapitre nous nous intéressons à la programmation, les stratégies de calculs, l'ergonomie et la performance du logiciel PhotoCloud.

I. PRESENTATION DU LABORATOIRE ET DU STAGE

1. Le laboratoire

L'Unité Mixte de Recherche UMR 694-MAP, « Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage », est constitué de cinq laboratoires créés en 1998 conjointement par le CNRS et le Ministère de la Culture et de la Communication. Les différentes équipes sont :

- ARIA (Applications et Recherches en Informatique pour l'Architecture), Ecole d'Architecture de Lyon.
- GAMSAU (Groupe de recherche pour l'Application de Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme), Ecole d'architecture de Marseille.
- CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie), Ecole d'Architecture de Nancy
- ASM (Architecture et Sociétés Montagnardes), Ecole d'Architecture de Toulouse.
- PAGE (Photogrammétrie Architecturale et Géomatique) Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg.

J'ai travaillé lors de mon stage dans le laboratoire MAP GAMSAU qui travaille plus particulièrement sur les problématiques de méthodes d'acquisitions et de représentations tridimensionnelles. Le laboratoire développe notamment des outils pour un projet nommé Nubes dont l'objectif est de réaliser un système d'information architectural qui exploite les relations 3D des monuments (structure, dimension...) avec des données hétérogènes de différentes sources (Historique, documentaire...).

2. Le projet Nubes



Dans le cadre du programme national de numérisation 3D du patrimoine, 3D monuments¹, la plateforme Nubes a été utilisé pour mener à bien certains projets pilotes tel que Carcassonne, Saint Guilhem le désert et l'église de la Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon. Cet ensemble de logiciel en constant cours d'évolution regroupe :

- Nubes Forma : Outil de reconstruction 3D à partir de nuage de points laser et de photographies.
- Nubes Visum : Système d'information et de visualisation 3D sur le web.
- Nubes Tempus : Outil de visualisation d'édifices au cours de l'histoire.
- Nubes Imago : Outil de sémantisation des images à partir de modèles 3D.

¹ www.map.archi.fr/3D-monuments/

3. Les objectifs du stage

Le stage proposé par monsieur Livio DE LUCA, Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, est d'enrichir la plateforme NUBES Forma en ajoutant un outil simple d'utilisation permettant de générer des nuages de points à partir de relevés photographiques d'édifices.

Ce projet comporte ainsi deux axes de réflexion complémentaires :

- La rédaction d'un protocole d'acquisition

Le relevé photographique d'un édifice doit suivre certaines conditions afin de pouvoir être traité correctement. La rédaction d'un protocole est donc nécessaire pour sensibiliser l'utilisateur et rendre le traitement opérationnel.

- Le traitement des données :

Les logiciels Pastis, Apero et MicMac développés par le laboratoire du MATIS de l'IGN ont toutes les caractéristiques nécessaires pour réaliser ce traitement. L'usage de ces logiciels est assez complexe et ils doivent faire l'objet d'une encapsulation à travers une interface conviviale pour l'utilisateur final. Ce projet a été appelé PhotoCloud.

II. PRESENTATION DES OUTILS UTILISES

Dans ce chapitre nous présentons les différents logiciels qui ont été nécessaires à la réalisation du projet PhotoCloud et les choix de programmation et d'installation qui ont été pris. Une approche un peu plus théorique est apportée au logiciel de la chaîne PAM (Pastis, Apero et MicMac) afin d'en comprendre leur fonctionnement.

1. Le système d'exploitation



Au début du stage j'ai eu à ma disposition un ordinateur vierge de tout système d'exploitation. La chaîne PAM étant à l'heure actuelle compatible uniquement sous LINUX c'est donc cet environnement de travail qui a été installé. La distribution gratuite utilisée est Fedora 12 car elle est la plus compatible avec MAYA.

Le choix du système d'exploitation est dans ce contexte de programmation multi-processus, loin d'être négligeable car c'est lui qui va orchestrer le dialogue entre les différents logiciels (cf chap IV, part. 1).

2. MAYA



MAYA est un logiciel de modélisation 3D développé par la société AutoDesk. C'est un modeleur à la fois complexe et très puissant utilisé largement dans le monde du cinéma et des animations 3D. Le laboratoire MAP GAMSAU a choisi ce logiciel pour la modélisation du patrimoine et le développement de sa plateforme NUBES Forma car il est très flexible grâce à ces modules de programmation.

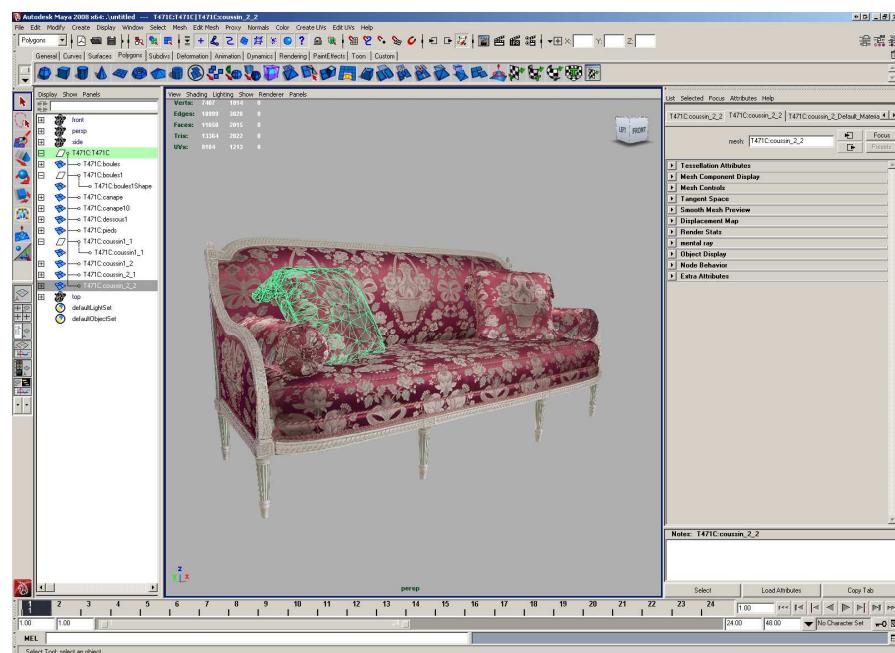


fig. 1 Interface de Maya

MAYA propose différentes solutions pour implémenter un logiciel dans son environnement² :

Les scripts :

En langages Python ou MEL (MAYA Embedded Language). Dans ces conditions les programmes sont interprétés et donc multiplateformes à partir du moment où MAYA peut être installé.

Le Python a une vocation d'ouverture à d'autres environnements (Blender par exemple) mais il reste dépendant des librairies de MAYA dans ce contexte.

Le MEL est le langage script propriétaire d'Autodesk. Il a été retenu par le laboratoire pour implémenter la plateforme de NUBES Forma.

L'API C++ de MAYA :

Dans ce cas les programmes sont compilés et de ce fait ils ne sont pas portables. Ils ont la caractéristique de pouvoir faire appel à des librairies extérieures et de se concentrer dans un seul fichier (.so,.mll ...).

3. Qt Creator



Qt creator est un puissant environnement de développement C++ multiplateforme libre distribué par Nokia. Cet outil permet ainsi de réaliser des programmes pouvant être portables.

Ce logiciel a permis de réaliser un petit logiciel utilisant les librairies C++ de MICMAC. Il est présenté dans le chapitre « Exportations des relèvements et des points SIFT3D ».

4. ImageMagick



ImageMagick est un logiciel libre permettant de nombreux traitements d'image au travers de lignes de commande. Il est proposé sous les plateformes Unix, Mac OS X et Windows.

Ce logiciel est principalement utilisé dans PhotoCloud pour changer le format, la compression et la taille des images. Ces fonctionnalités sont utiles pour l'ergonomie dans l'interface et la compatibilité entre les différents processus.

² <http://download.autodesk.com/us/maya/2009help/index.html>

5. Les outils du MATIS

a) Présentation de la chaîne PAM

La chaîne de traitement photogrammétrique suit principalement trois grandes phases :

- La mise en correspondance des photos avec le module PASTIS :
Cette étape détecte dans chaque image un ensemble de points SIFT dont on cherchera automatiquement les homologues dans les autres images du chantier.
- Le calcul de calibration et d'aérotriangulation avec le module APERO :
APERO permet ainsi de calibrer les appareils photos et de déterminer les positions et les orientations des différents sommets de prises de vue.
- La corrélation dense avec le module MICMAC :
Ce logiciel permet à partir des précédentes données calculées et des photos de générer des cartes de profondeur et des nuages de points.

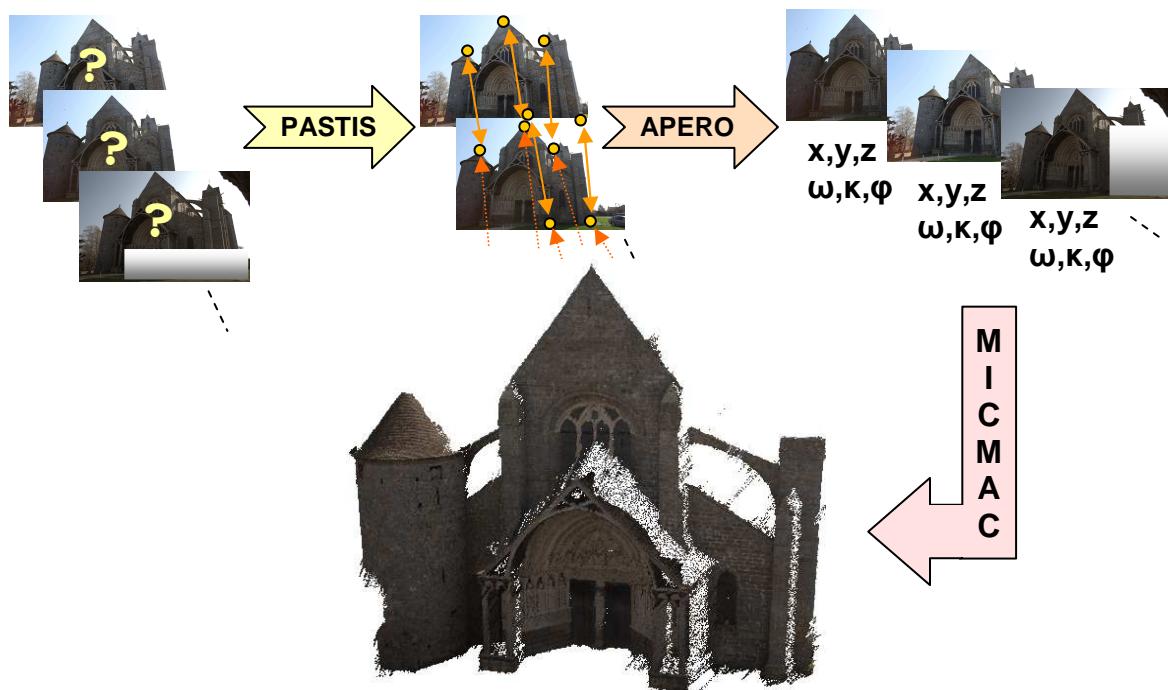


fig. 2 Schéma de la chaîne PAM

b) PASTIS

PASTIS est l'acronyme de **P**rogramme utilisant **A**utopano **S**ift pour les **T**ie-points dans les **I**mages. Ce logiciel permet de détecter des points d'intérêt dans les images du chantier et de les appairer dans un second temps suivant la méthode SIFT (Scale Invariant Feature Transform) du professeur David Lowe³.

i. Détection des points d'intérêt

Les points d'intérêt sont des points caractéristiques dans les images qui sont susceptibles d'être retrouvés dans d'autres images. On parle alors de répétabilité des points. Il existe différents détecteurs de points d'intérêt et celui implémenté dans PASTIS est le détecteur SIFT. Il s'agit de l'implémentation Sift++ (Andrea Vedaldi) modifiée par le laboratoire MATIS

Le principe :

L'image originale est convoluée à différentes Gaussiennes dont l'écart type évolue d'un facteur σ_i à $2\sigma_i$. Ce jeu de données est appelé une octave.

On itère par la suite ce procédé avec l'image originale de l'octave précédente sous échantillonnée de moitié avec comme écart type pour la Gaussianne $\sigma_i = 2\sigma_i$.

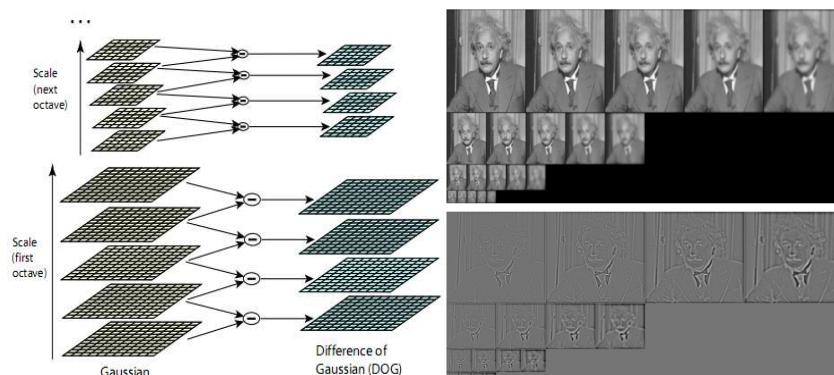


fig. 3 Espace d'échelle des images

Au sein d'une octave sont calculées les différences entre les images Gaussiennes, les DOG (Difference of Gaussian). Un point SIFT potentiel est un extrema local d'un DOG qui est également un extrema par rapport aux DOG des niveaux juste au dessus et juste en dessous.

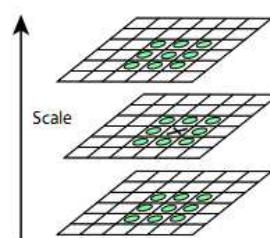


fig. 4 Zone de l'extrema

³ David G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints"

Ces points sont ensuite filtrés en fonction de leur contraste et de leur caractéristique géométrique (placé sur une arrête...). Il est attribué aux points résultants un descripteur SIFT (vecteur de dimension 128) qui servira lors de l'appariement.

Création du descripteur SIFT :

Dans une première phase on calcule l'orientation des gradients des voisins du point d'intérêt. Ces orientations sont ensuite classées dans un histogramme dont le plus haut pic définit l'orientation du point d'intérêt (il y dédoublement du point d'intérêt si le second plus haut pic est supérieur à 80% du premier).

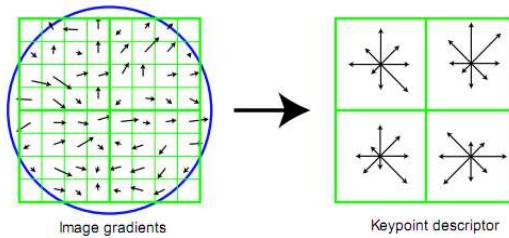


fig. 5 Histogramme des gradients par zone d'orientation

Dans un second temps les orientations des gradients des voisins du point d'intérêt sont recalculées relativement à l'orientation du point d'intérêt déterminé dans la première phase. Des histogrammes d'orientations sont calculés par fenêtre de voisinage (cf image ci-dessus) et le descripteur SIFT est la concaténation de tous ces histogrammes. Le vecteur ainsi obtenu est enfin normalisé afin d'être insensible aux variations d'éclairage.

Les points SIFT ainsi détectés sont robustes aux variations d'échelle, aux rotations et au bruit. Ils sont cependant sensibles aux fortes transformations affines et au phénomène de diachronisme (date de prise de vue différente).

ii. Appariement

L'appariement consiste à déterminer si un point d'une image est l'homologue d'un point d'une autre image. L'appariement des points SIFT se base sur le calcul des distances euclidiennes dans l'espace des descripteurs SIFT. On détecte ainsi quels sont les deux plus proches voisins au sens des descripteurs. L'appariement entre deux points sera effectué si le premier voisin est bien plus proche que le second et si sa distance est relativement faible.

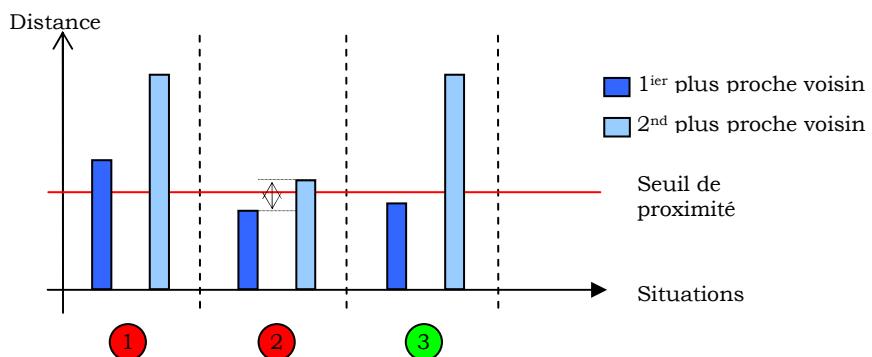


fig. 6 Principe de l'appariement SIFT

c) APERO

APERO est l'acronyme de **Aérotriangulation Photogrammétrique Expérimentale Relativement Opérationnelle**. Ce logiciel permet de calculer la calibration et le relèvement (position et orientation) des caméras d'un chantier. Il peut également réaliser des aérotriangulations en l'air (sans points d'appuis). Cette dernière configuration est très pratique dans le contexte des missions du laboratoire.

Nous présentons dans la suite du document les modèles de distorsion utilisée par APERO ainsi que le principe des calculs effectués pour le relèvement des caméras.

i. Modèle de distorsion des caméras :

La calibration permet de reconstruire avec précision les faisceaux en 3D qui ont impacté les pixels de l'image. Cette reconstruction est fonction de la distance principale (ou focale) et d'un modèle de distorsion.

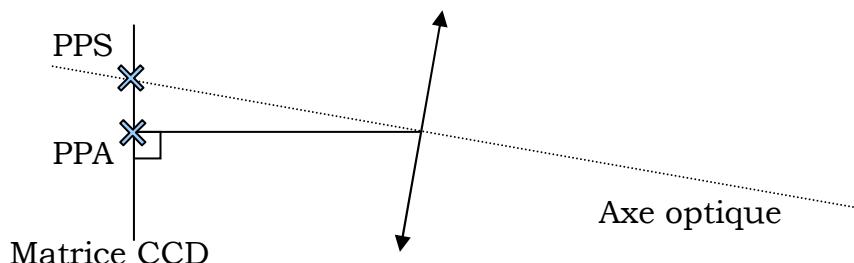
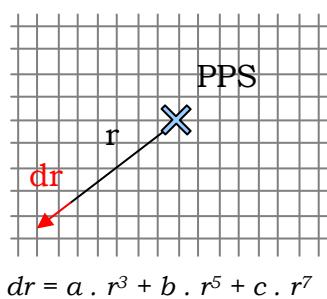


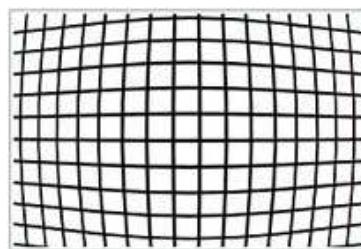
fig. 7 Points caractéristiques de la caméra

Le modèle de distorsion classique retenu dans cette chaîne de traitement est un modèle radial. Le principe est de corriger les pixels de l'image d'une distance dr sur le rayon r par rapport au point principal de symétrie (PPS).

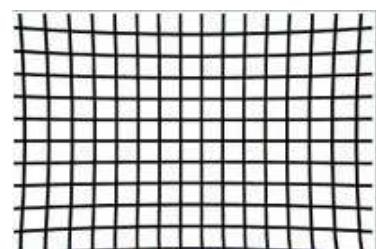


$$dr = a \cdot r^3 + b \cdot r^5 + c \cdot r^7$$

Modèle de correction



Effets de la distorsion sur une arille réaumière



Dans le cas des objectifs fisheye (objectif à courte focale couvrant un angle de 180° dans la diagonale) ce modèle de distorsion devient insuffisant. En effet la distorsion optique est plus complexe, le modèle utilisé est la combinaison d'un modèle physique radial et d'un modèle polynomial admettant un grand nombre de paramètres (jusqu'à 50, tous n'étant pas en général utilisés). Pour le fisheye utilisé lors de ce stage, le modèle physique est le modèle équidistant (la distances entre un point images et le centre de distorsion est proportionnelle à l'angle des rayons objets issus de ces points). Le résultat de la calibration obtenu est enregistré sous forme d'une grille de transformation afin d'alléger les traitements faits par la suite.

ii. Principe des calculs dans APERO

APERO est un logiciel piloté au travers d'un fichier de paramètres aux formats XML. La stratégie de calcul d'APERO est élaborée au sein de ce fichier ce qui rend le logiciel très flexible à toutes formes de chantiers (cf Chap IV part. 4). Nous présentons ici les grands principes du calcul.

Le moteur de calcul d'APERO contient deux sous ensembles principaux :

- Un module permettant de calculer les solutions initiales. Ce module se base sur un ensemble d'algorithme donnant des solutions directes (matrice essentielle, relèvement dans l'espace) et un ordonnanceur permettant de trouver une stratégie optimale d'ajout des images.
- Un module de compensation permettant d'affiner les solutions par minimisation de moindres carrés non linéaires. Ce module se base sur la méthode de Gauss-Newton (itérations successives de linéarisation et de moindres carrés).

Les principales équations⁴ du système mis en jeu sont :

- L'équation de correction de la distorsion (cas du modèle radial) :

$$\begin{aligned}x &= x' + dx' \quad \text{et} \quad y = y' + dy' \\dx' &= (x' - x_{pps}) (a' r'^2 + b' r'^4 + c' r'^6) \\dy' &= (y' - y_{pps}) (a' r'^2 + b' r'^4 + c' r'^6)\end{aligned}$$

avec : $r'^2 = (x' - x_{pps})^2 + (y' - y_{pps})^2$
x et y : coordonnées théoriques
x' et y' : coordonnées réelles

- La fonction image réelle :

$$\begin{aligned}x' + dx' &= \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1} \\y' + dy' &= \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1}\end{aligned}$$

Les équations ci-dessus sont en réalité linéarisées afin de pouvoir être résolues par moindre carré. Ainsi les caméras du chantier ont toujours avant un premier calcul une calibration initiale. Cette calibration correspond à une caméra parfaite (PPS et PPA au centre de l'image et les coefficients de distorsion nuls). La convergence du système est ainsi obtenue par itération et compensation.

⁴ Mathématiques de la photogrammétrie numérique, Jean-François HAAS 2004

Lors de la phase d'initialisation, on fixe une image ainsi que la base associée au premier couple du chantier. Ceci définit ainsi le facteur d'échelle du modèle. Par la suite un arbre des images du chantier est généré avec une mesure de profondeur (distance par rapport à l'image fixée). Les premières itérations du calcul de l'aérotriangulation vont consister à ajouter les images successivement par palier de profondeur. Les étapes suivantes de compensation sont paramétrées dans le fichier XML en fonction des caractéristiques du chantier.

d) MICMAC

MICMAC est l'acronyme de **M**ulti-**I**mages **C**orrespondances, **M**éthodes **A**utomatiques de **C**orrélation développé par le laboratoire du MATIS. Cet outil très puissant permet entre autre de réaliser des cartes de profondeurs et des nuages de points à partir de photographies géoréférencées. Tout comme APERO, MICMAC est un logiciel dont les paramètres sont contenus dans un fichier XML. Nous présentons ici le principe du fonctionnement de MICMAC⁵.

i. Généralité

La corrélation dense utilisée dans MICMAC a une approche multistéréoscopique d'une scène d'étude afin de rendre plus robuste la détermination des points dans l'espace. Une image dite « maîtresse » est choisie parmi les images de la scène afin de définir la géométrie de référence dans laquelle MICMAC va travailler. Ainsi la carte de profondeur générée sera exactement dans la même géométrie image que l'image maîtresse.

La zone de corrélation dans laquelle MICMAC travaille est définie par un masque saisi sur l'image maîtresse. La carte de profondeur et le nuage de point sont ainsi contenus dans un cône de recherche.

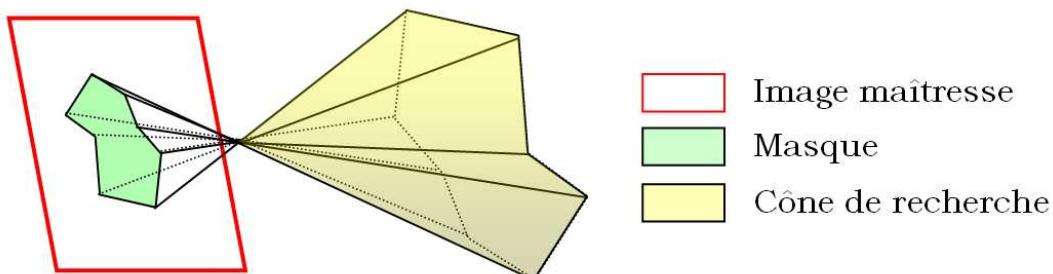


fig. 8 Principe du masque dans MicMac

ii. Détermination des points dans l'espace

La détermination des profondeurs des points dans le cône de recherche se traduit dans les images par la mesure de parallaxe. Le calcul de corrélation entre plusieurs images pour un pixel donné de l'image maîtresse permet ainsi de déterminer ses points homologues et d'accéder à la parallaxe.

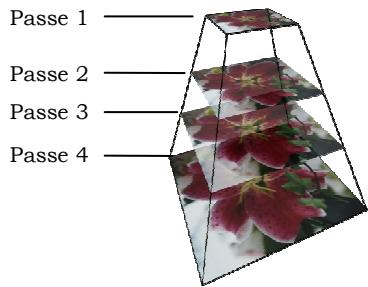
⁵ <http://www.MicMac.ign.fr/uploads/media/Bulletin-Info-IGPN-2007.pdf>

Le score de corrélation dans le cas multistéréoscopique est calculé par la formule :

$$Corr(I_1, \dots, I_N) = \frac{2 * \sum_{1 \leq k < l \leq N} Corr(I_l, I_k)}{N(N-1)} \quad \text{où} \quad Corr(I_l, I_k) \quad \text{est la corrélation centrée normalisée entre fenêtre.}$$

Cette formule symétrise le problème en ce sens que l'image maîtresse n'a pas de statut privilégié.

iii. Stratégie de calculs



La multitude de combinaisons de placement des fenêtres pour le calcul de corrélation est très coûteuse en temps machine. Afin de limiter ce coût, MICMAC construit une pyramide d'image et il explore toutes les combinaisons possibles seulement dans l'image en haut de la pyramide. L'espace des possibles est toutefois quantifié et limité par des variables contenues dans le fichier de paramètres XML.

MICMAC coupe également les images en dalles lorsque la taille des images devient trop importante afin de paralléliser les calculs.

La mise en correspondance (MEC) présente la stratégie que va suivre MICMAC pour descendre les différents étages de la pyramide. L'étage E-1 donne une carte de profondeur (ou surface) qui servira de prédictif à l'étage E. Une enveloppe autour de cette surface est paramétrée afin de définir l'espace de recherche des fenêtres de corrélation.

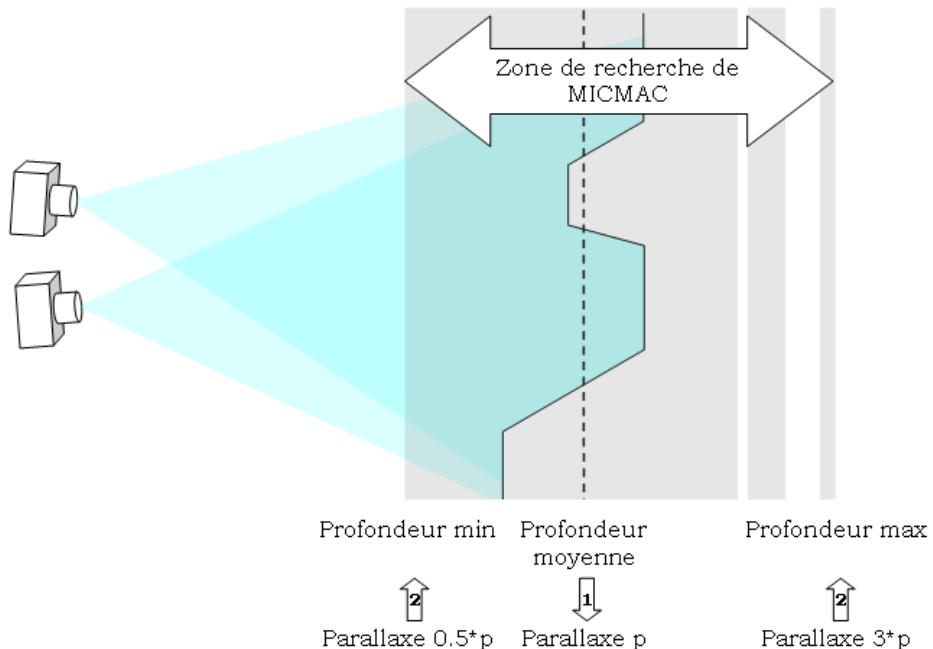


fig. 9 Zone de recherche de MicMac

La génération finale de la surface de l'étage E suit une approche énergétique : elle est le résultat d'un compromis entre le score de corrélation (l'attache aux données) et un terme de régularisation de la surface.

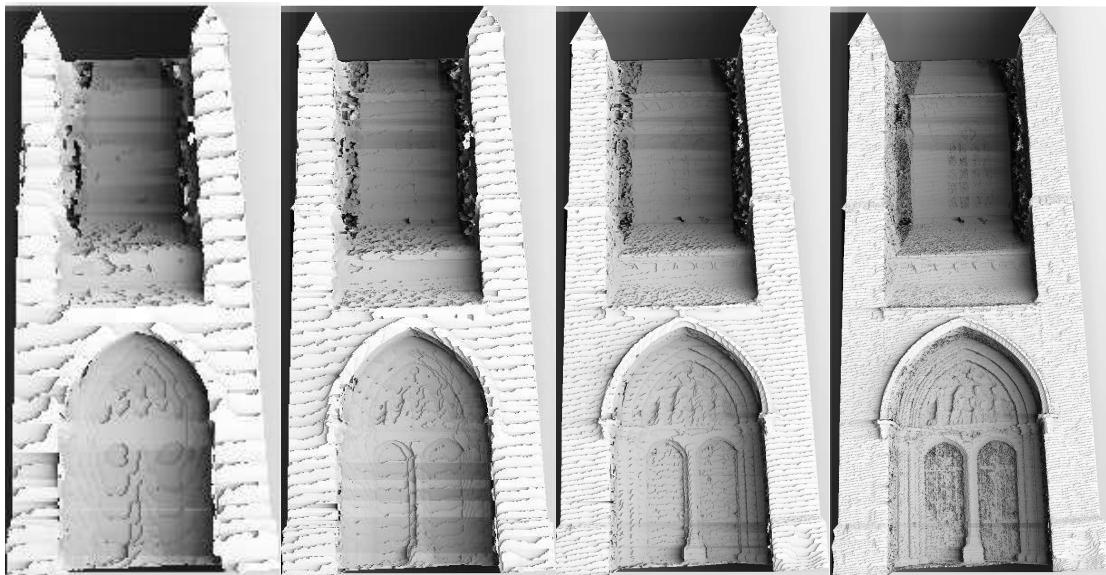


fig. 10 Ombrages de surface à différents niveaux de la pyramide

e) Les librairies C++ associées

Les librairies des classes d'objet c++ représentant les éléments photogrammétriques utilisés par APERO et MICMAC sont accessibles sur le site MicMac.fr. Ces librairies permettent ainsi de programmer des exécutables communiquant facilement avec les logiciels du MATIS. En effet ils utilisent de ce fait la même structure et la même logique. Les méthodes très utiles de ces classes sont ainsi facilement accessibles. Certaines d'entre elles ont été utilisées lors du stage (cf Chap.IV part. 5).

III. REDACTION DU PROTOCOLE D'ACQUISITION

La construction du protocole d'acquisition s'est réalisée tout au long du stage. En effet une boucle d'apprentissage a été mise en place entre le contrôle de la chaîne de traitement PAM, le protocole à réaliser et l'expérience du terrain apporté par ses contraintes physiques tout au long des quatre mois.

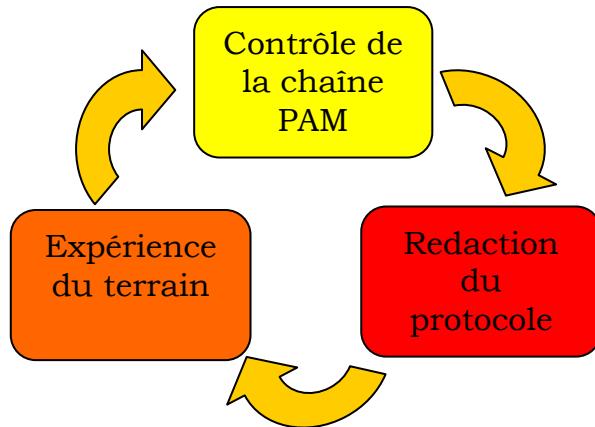


fig. 11 Boucle d'apprentissage

Nous présentons dans ce chapitre les différents chantiers qui ont été traités et les leçons qui en ont résulté. La majorité des situations rencontrées étaient pour modéliser des éléments d'architecture.

Dans une deuxième partie nous présentons le protocole qui a été réalisé pour guider sur le terrain les utilisateurs de PhotoCloud.

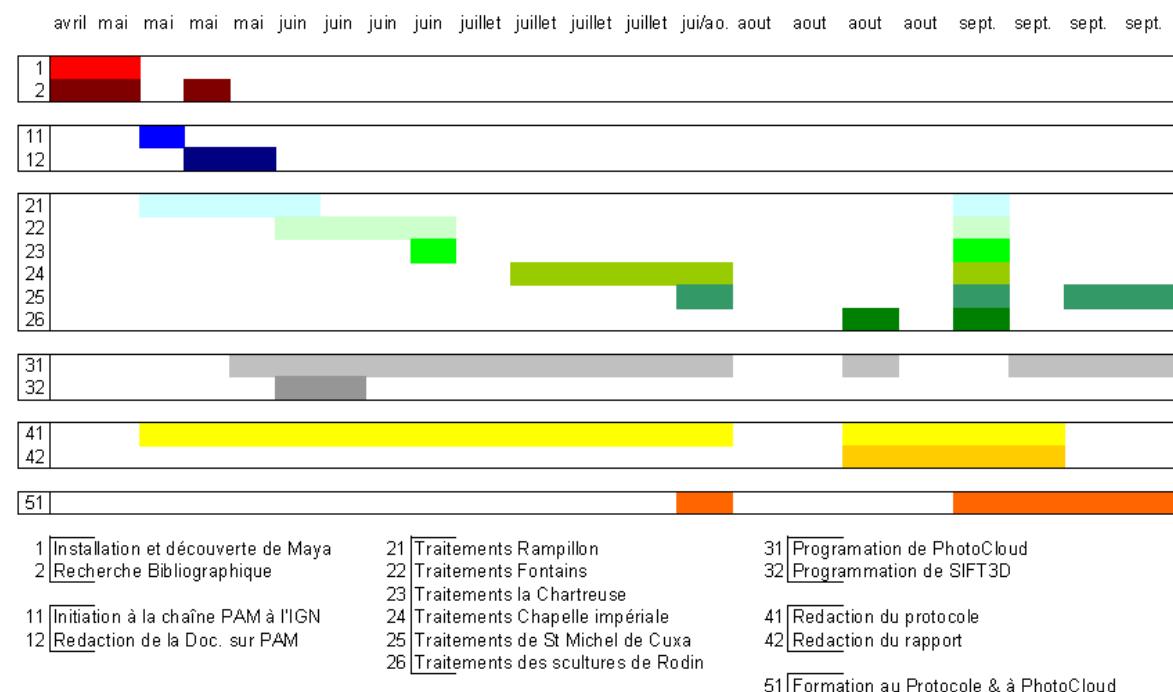


fig. 12 Calendrier des activités du stage

1. Traitements de sites :

a) L'église de Rampillon



L'église de Rampillon a été le premier site où j'ai découvert avec l'aide précieuse de Marc Pierrot Deseilligny les grands principes de la méthodologie d'acquisition et de traitement avec la chaîne PAM à l'IGN.

Condition du terrain :

L'église d'une superficie d'environ 200 m² était visible de toutes parts avec un recul maximum de 4 mètres sur la face nord. Les prises de vues ont été effectuées entre 11 heures et midi trente avec un ciel dégagé.

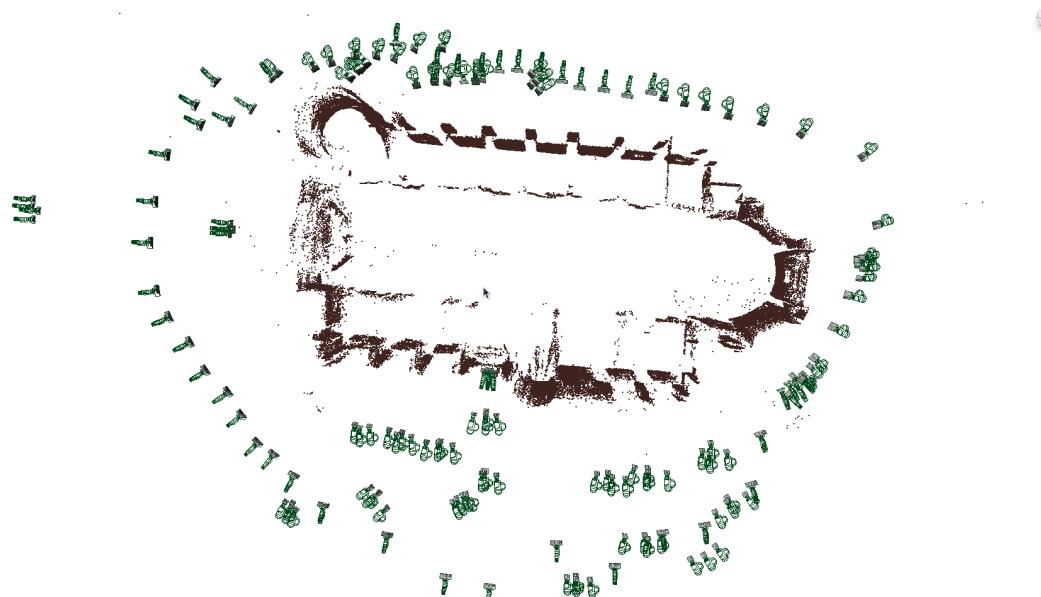
Matériel utilisé :

Pour ce premier exercice j'ai utilisé le Canon EOS 5D Mark II du MATIS avec des objectifs de focales 24 mm et 35 mm.

Bilan de la mission :

Ce site m'a permis d'apprendre la logique d'acquisition pour réaliser une aérotriangulation générale de l'ensemble du bâtiment et de m'exercer sur quelques sites de corrélation de l'église. Le traitement des 162 images a été réalisé en collaboration avec Marc Pierrot Deseilligny à l'IGN lors d'une semaine de formation à la chaîne PAM.

L'église a été entièrement traitée à la fin du stage avec PhotoCloud ce qui a permis de réaliser ce plan de situation :



b) L'église de Fontains



L'église de Fontains a été photographiée quelques semaines après l'église de Rampillon. L'acquisition a été effectuée en présence de Marc Pierrot Deseilligny et le traitement à été entièrement effectué en autonomie au sein du laboratoire MAP GMSAU. PhotoCloud étant à ce moment en cours de développement, le traitement à été réalisé « classiquement » en ligne de commande avec la rédaction des fichiers de paramètres XML de façon manuelle.

Condition du terrain :

L'église a une superficie d'une centaine de mètres carrés. La végétation obstruait la visibilité sur deux faces du bâtiment. De ce fait le recul maximum dans ces zones a été de 2 mètres. L'acquisition étant faite en fin de journée, la luminosité était plutôt faible.

Matériel utilisé :

J'ai utilisé le Canon EOS 5D Mark II du MATIS sur pied avec des objectifs de focales 24mm, 35 mm et 50 mm.

Bilan de la mission :

L'objectif de cette mission a été d'expérimenter la construction d'un nuage de point sur la totalité d'un édifice à partir de corrélations denses. Pour ce faire trois focales ont été utilisées afin d'avoir une densité d'information relativement homogène sur l'ensemble du bâtiment (mur au sol, clocher ...). Lors des calculs d'aérotriangulation, un site de corrélation n'a pas pu être connecté à l'ensemble du chantier car la « surface utile » de l'image était trop faible (photo de mur trop rasante afin d'avoir les contreforts).



c) La Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon



A la fin du second mois de stage je suis allé à la Chartreuse de Villeneuve-lez-Avignon afin de tester le processus sur une fresque et un élément d'architecture creux, la fontaine Saint Jean.



Condition du terrain :

La fresque est située dans une salle à l'intérieur du cloître. Ce jour là différents laboratoires convoqués par le CICRP, le Centre Interrégional de Conservation et Restauration du Patrimoine, ont étudié cette œuvre par diverses techniques (infrarouge, radio, ultra-violet...) et nous avons pu bénéficier de lampes de qualités.

La fontaine Saint Jean située en extérieur a été acquise en milieu de journée avec un temps dégagé.

Matériel utilisé :

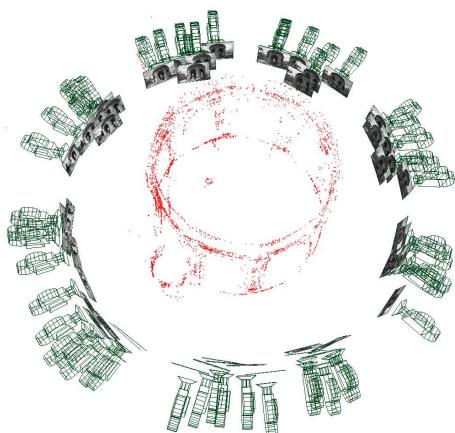
J'ai utilisé l'appareil Nikon D3x du laboratoire du MAP GAMSAU avec un objectif de focale 20 mm.

Bilan de la mission :

Le calcul sur la fresque a très bien marché dû à la richesse des textures.



La fontaine Saint Jean a été plus complexe à traiter car j'ai été confronté au problème de diachronisme. En effet l'extérieur et l'intérieur de la fontaine ont été respectivement pris avant et après le déjeuner. Les ombres ne correspondant plus entre ces deux acquisitions, le calcul de l'aérotriangulation a dû être scindé en deux.



d) La Chapelle Impériale d'Ajaccio



Le laboratoire du MAP en collaboration avec le CICRP et la DRAC de Corse (Direction Régionales des Affaires Culturelles) travaille sur de nouvelles méthodes pour analyser l'état de conservation des édifices patrimoniaux. Dans ce contexte ils souhaitaient effectuer un calcul de corrélation dense sur la chapelle impériale des Bonaparte à Ajaccio avec différentes résolutions de nuage pour tester ces produits.

Condition du terrain :

Les zones d'intérêts sinistrées de la chapelle étaient à l'intérieur du bâtiment sur des fresques. J'ai travaillé avec Marc Pierrot Deseilligny sur la nef, le transept, le chœur ainsi que sur les bas côtés. Nous avons été dans ces conditions sur un chantier divergent (le premier du stage).

Matériel utilisé :

Nous avons utilisé le Canon EOS 5D Mark II du MATIS sur pied avec des objectifs de focales 15mm, 35 mm et 100 mm et le Nikon D3x du MAP sur pied avec des objectifs de focales 20mm, 24mm et 85mm.

Bilan de la mission :

Cette mission a permis de montrer qu'il était possible de travailler avec des objectifs aux caractéristiques optiques bien distincts (du fisheye au téléobjectif) et de savoir comment traiter les différents modèles de calibration lors du calcul. Le traitement des bas côté n'ont cependant pas été concluant pour diverses raisons :

- Les murs étaient récemment peint avec une couleur unie sans réelle imperfection ce qui limita fortement le nombre de points d'intérêt détectés.
- Le choix de l'objectif (20 mm) qui n'était pas assez court pour avoir un contexte suffisant sur la prise de vue.
- Les images d'une arche à l'autre étaient presque identiques (conséquences des deux premiers points).



e) Corbeaux et chapiteaux de Saint Michel de Cuxa



Anna Thirion, membre du laboratoire MAP GAMSAU, étudie pour sa thèse certains éléments architecturaux de l'abbaye de saint-Michel de Cuxa (Pyrénées Orientale) qui ont été exportés au Etats-Unis entre 1907 et 1913. Malheureusement les conservateurs de ces pièces ont interdit tous relevés au laser dans un souci de protections des sculptures.

Ce contexte a incité Anna à tester le protocole d'acquisition de PhotoCloud pour mener à bien ces relevés. Nous avons donc échangé par mail des conseils et des observations ce qui fut très enrichissant.

Condition du terrain :

Les corbeaux étaient à l'intérieur du musée avec un éclairage artificiel. Les chapiteaux étaient au cœur du cloître et ils avaient des conditions d'éclairage très variant. Certain d'entre eux avaient de plus des parties cachées.

Matériel utilisé :

Le Nikon D300 sur pied avec les objectifs d'une focale de 24 mm et 85 mm.

Bilan de la mission :

Cette mission a été significative dans le traitement des calibrations des télescopeobjectifs. En effet cette situation a permis de détecter que le logiciel APERO peut avoir une instabilité à calibrer les télescopeobjectifs s'ils n'ont pas un support images avec des focales plus courtes.

En ce qui concerne les chapiteaux avec des parties cachées nous avons fait le test de tourner les chapiteaux sans déplacer la caméra. Dans ces conditions nous avons fait attention au derrière de la scène pour qu'il soit le plus homogène possible afin de limiter au maximum la détection de points d'intérêt sur le fond. Le résultat de ce test sera effectué durant le mois de septembre.



f) Objets d'art du musée Rodin



Le ministère de la culture effectue des missions pilotes dans le cadre d'un projet de numérisation du patrimoine Français. Dans ce contexte, j'ai été amené à réaliser quelques tests au musée Rodin sur la sculpture du Sommeil. Ce fut également l'occasion de sensibiliser monsieur Jean Marsac, chercheur du C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France), aux contraintes d'acquisition d'un chantier photogrammétrique.

Condition du terrain :

Le Sommeil est une sculpture en marbre blanc située dans une salle du musée Rodin. Le recul maximum disponible sur l'œuvre était de 80 centimètres. Sa forme relativement simple, pratiquement convexe, a permis de limiter le nombre de cliché à une cinquantaine de photos. La réflexion sur le marbre poli a été limitée en éteignant les lumières intérieures.

Matériel utilisé :

Le Nikon D3x du laboratoire MAP GAMSAU sur pied avec un objectif d'une focale de 20 mm.

Bilan de la mission :

Cette mission a permis de tester PhotoCloud sur un matériel peu contrasté. Les résultats ont plutôt été satisfaisants avec MicMac hormis sur les zones en contre jour.

Dans ce genre de chantier il faut particulièrement être vigilant à la mise au point de l'appareil car l'objet peut rapidement sortir de la profondeur de champs.



2. Le protocole

Le protocole présenté ici est la synthèse des éléments retenus dans la boucle d'apprentissage présentée plus haut. Ce document a été remis au laboratoire GAMSAU comme un aide-mémoire pour les opérateurs lors de l'acquisition d'un chantier.

a) Condition du terrain

La première chose à faire lorsqu'on arrive sur un chantier est d'en faire un premier tour en faisant attention aux occlusions faites par la végétation et au recul maximum possible. Ces deux points sont essentiels car ils permettent d'évaluer le ou les focales à utiliser sur le chantier. Le choix des focales aura une incidence notable sur le nombre de prises de vues et la finesse du nuage de points à réaliser.

Les contre-jours sont, dans la mesure du possible, à éviter. On préférera ainsi réaliser le chantier en milieu de journée ou lorsque le ciel est voilé.

b) Paramétrage de la caméra :

Avant de pouvoir traiter correctement un chantier il est important de calibrer l'appareil photo afin de connaître la géométrie d'acquisition. Dans le processus mis en place ici l'appareil sera autocalibré mais ceci implique qu'il ne faut pas modifier au cours d'une séance de prise de vue certains paramètres de l'appareil.

- Mise au point :

L'Autofocus doit être désactivé, la mise au point sera réglée en fonction du recul moyen que l'on a sur l'édifice. La profondeur de champs peut être également modulée avec l'ouverture choisie.

- Focale :

Il est conseillé d'utiliser des objectifs à focale fixe. Dans le cas contraire il est important de ne pas la modifier.

- Mode de prise de vue :

Il est conseillé de se placer en mode priorité à l'ouverture (A ou AV) car l'ouverture a une influence sur la calibration.

- Format d'enregistrement :

Les images prises ne doivent avoir subies aucun prétraitement, il faut donc les enregistrer au format RAW.

- Changement de focale/objectif :

Il peut arriver que sur un chantier on soit tenté de vouloir zoomer afin de prendre des éléments plus lointain (haut d'un clocher par exemple). Dans ce cas l'opérateur changera d'objectif (ou de focale) et devra calibrer la nouvelle configuration de l'appareil sur un site de calibration.

c) Choix d'un site de calibration:

Il est recommandé avant chaque utilisation d'une nouvelle configuration de caméra de prendre au préalable une dizaine de photos sur un site de calibration. Le recouvrement de ces photos doit être important (90%) et les angles de prises de vues doivent être différents.

Afin de bien déterminer les coefficients de distorsion tout l'espace de l'image doit être utilisé.



La qualité de détermination de la focale est accrue avec des scènes ayant différents niveaux de profondeur. Un site recommandé pour la calibration est donc par exemple un coin de bâtiment car il respecte chacune de ces conditions.

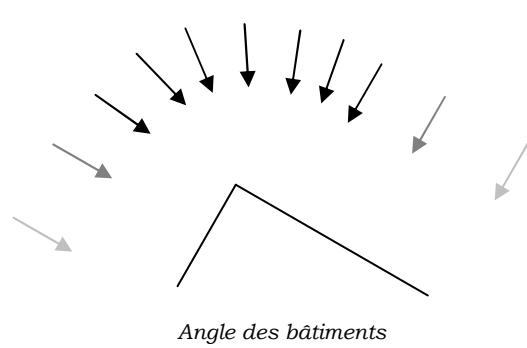
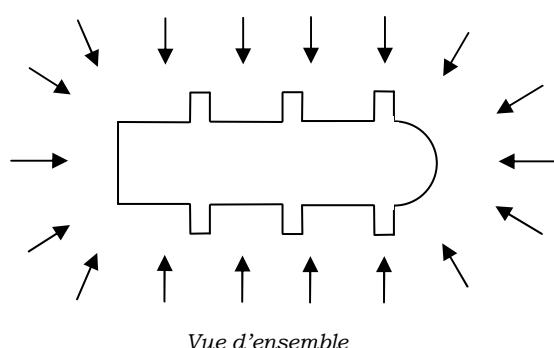


A propos des téléobjectifs :

Si sur le chantier vous devez utiliser un téléobjectif, veillez à utiliser le même site de calibration que celui choisi avec un objectif de focale moyenne. En effet la calibration des téléobjectifs est plus délicate que les autres objectifs et nécessite des « images d'appuis ».

d) Acquisition globale du site :

Cette phase a pour but de donner une vue d'ensemble du bâtiment et permet après le calcul d'aérotriangulation d'avoir une cohérence spatiale de toutes les photographies prises.

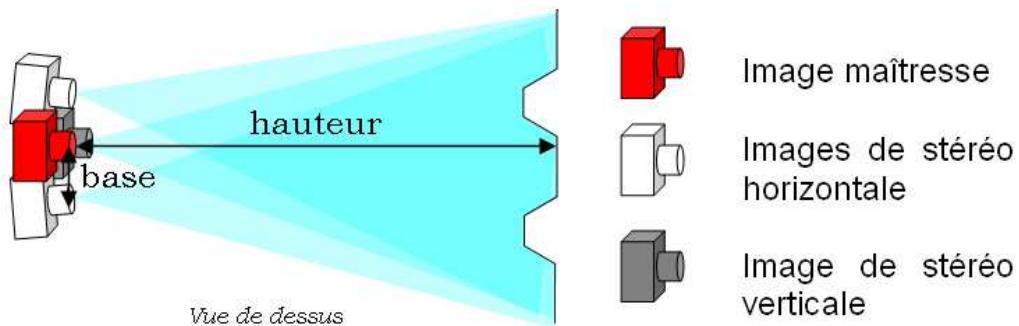


Il vaut mieux utiliser une seule configuration de caméra lors de cette étape. Le recouvrement entre les différentes images « supports » ou « passerelles » doit être de 80% afin d'assurer une détection automatique suffisante des points homologues. Il faut également faire attention à la proportion de surface réellement utile sur les photos (le ciel est par exemple inutilisable).

Dans le cas d'angles de bâtiment il faut tourner autour de l'arrête lentement (5/6 clichés) afin que les déformations dues à la perspective puissent être suivies par le traitement automatique.

e) Acquisition d'un site de corrélation

Un site dit de corrélation correspond à un jeu de quatre ou cinq vues d'un élément architectural dont on souhaite générer un nuage de point. Le rapport base sur hauteur (cf. schéma ci-dessous) doit être de 5% afin d'éviter au maximum les parties cachées et les déformations dues à la perspective.

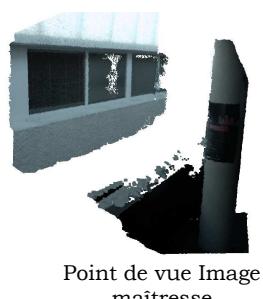


L'image maîtresse est l'image centrale du site d'intérêt, elle joue un rôle particulier lors du traitement des images. L'image stéréo verticale est prise afin de bien distinguer les lignes de surplomb horizontales.

Il peut arriver que le site d'intérêt nécessite d'être pris de beaucoup plus près que ce que la session d'acquisition globale ne l'a été. Dans ce cas il faut prendre un certain nombre d'images « passerelles » entre les premières conditions de prise de vue et celles attendues.

f) Type de Matériaux pour la corrélation

Les cartes de profondeurs et les nuages de points générés par le logiciel MicMac se base sur le calcul de corrélation de vignettes entre images. Ainsi les matériaux homogènes et sans texture seront difficiles à déterminer en 3D. Il en est de même bien sûr pour les surfaces transparentes (verre...) et réfléchissantes. De simples reflets peuvent parfois perturber le calcul de corrélation.



Point de vue Image maîtresse



Mauvaise corrélation sur les zones homogène



Mauvaise corrélation sur les surfaces vitrées

IV. PHOTOCLOUD

Ce chapitre présente plus en détail comment PhotoCloud utilise la chaîne PAM et s'est intégré à NUBES Forma. Les stratégies de calculs qui ont été choisies durant le stage ainsi que les tests de performances du logiciel. Cette présentation est accompagnée de quelques illustrations permettant de visualiser l'interface utilisateur produite.

La première partie plus technique présente de façon générique comment PhotoCloud pilote un logiciel extérieur.

1. Photocloud et les processus :

La première problématique de programmation du stage a été de mettre en place un moyen de communication entre les logiciels de la chaîne PAM et PhotoCloud qui s'intègre à NUBES Forma.

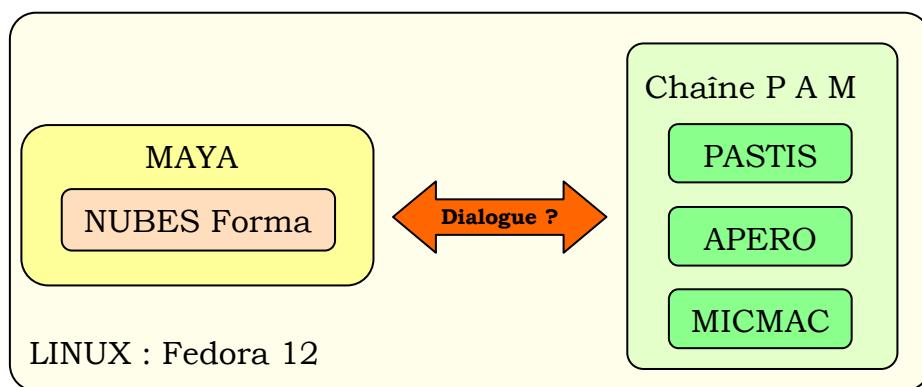


fig. 13 Processus et système d'exploitation

Ce schéma illustre l'impact essentiel du système d'exploitation (OS) qui est le lieu du dialogue entre les différents logiciels. On parle alors de processus.

Process Name	Status	% CPU	Nice	ID	Memory	Waiting Channel	Session
im-settings-daemon	Sleeping	0	0	1802	644.0 KiB	poll_schedule_timeout	
make	Sleeping	0	0	9759	280.0 KiB	do_wait	
maya	Sleeping	0	0	2067	292.0 KiB	sys_rt_sigsuspend	
maya.bin	Sleeping	0	0	2087	779.6 MiB	hrtimer_nanosleep	
metacity	Sleeping	0	0	1763	3.2 MiB	poll_schedule_timeout	gnome
MICMAC	Running	96	0	9761	294.9 MiB	0	

fig. 14 Liste de processus sous Fedora

Chaque processus exécuté par le système d'exploitation a un PID (Process Identifier) qui va servir d'identifiant. On utilisera ainsi le PID pour recueillir certaines informations sur le processus souhaité.

Je présente dans la suite du chapitre les différents outils étudiés pour mettre au point les échanges d'informations entre MAYA et les processus extérieurs.

a) Communication de Maya vers des processus extérieurs :

Le langage script MEL de Maya propose différentes fonctions afin de lancer une commande au système d'exploitation comme s'il s'agissait d'une commande directement rédigée dans une console système. En réalité il y a quelques différences car nous sommes dans l'environnement de Maya. Cette subtilité m'a permis de découvrir par exemple que pour lancer un exécutable de la chaîne PAM il existait des librairies C++ au sein du dossier d'installation de Maya qu'il fallait mettre à jour. Dans une vraie console système ce problème n'aurait par exemple pas existé.

Les commandes MEL proposées pour lancer un processus extérieur sont :

- system (« ligne de commande »):

Avec *system* Maya attend la fin du processus lancé pour continuer le script. Les informations renvoyées par le processus sont retransmises à la console script de Maya. Cette situation n'est pas vraiment ergonomique pour l'utilisateur qui doit traduire des informations affichées et en déduire un état d'avancement.

- exec (« ligne de commande »):

Avec *exec* Maya lance le processus et le script continue. Dans ce cas il n'y a pas de contrôle du bon déroulement du processus lancé au travers de la console script. En revanche *exec* renvoie le PID du processus qui va être une donnée très utile pour suivre l'avancement du processus.

- Les tuyaux (*popen* & *pclose*):

La programmation avec des tuyaux (ou « pipes ») est un compromis entre les deux précédents outils présentés. Le principe est d'ouvrir un tuyau en spécifiant la ligne de commande système à lancer. Un flux directement accessible dans Maya est alors dédié aux informations retranscrit par le processus et le tuyau est refermé à la fin du processus.

Cet outil est en théorie le plus intéressant pour analyser l'état d'avancement des processus mais la pratique a montré que parfois ce procédé est instable suivant les commandes systèmes.

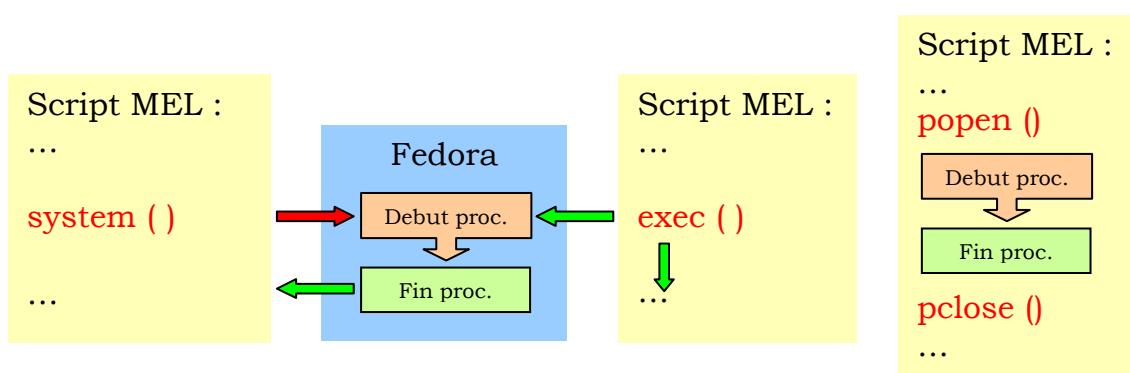


fig. 15 Mécanismes inter-processus en script MEL

La solution retenue dans la programmation de PhotoCloud a été d'utiliser en majorité la méthode *exec* et dans certains cas la commande *system* et les tuyaux.

b) Communication des processus extérieurs vers MAYA

Ce sens de communication est essentiel pour rendre compte de l'évolution d'un processus à l'utilisateur. Les solutions de communication trouvées ont été les tuyaux (cf précédent paragraphe) et l'utilisation des PID avec le système d'exploitation après une commande `exec`.

Cette seconde solution est complètement dépendante du processus lancé. En effet certains processus vont par exemple créer des fichiers dans un répertoire particulier (cas de Pastis) ou renvoyer des informations via une console (cas de APERO et MICMAC). Dans les deux cas on doit déterminer quelles sont les étapes clés qu'il faut détecter pour évaluer l'évolution.

Le dialogue n'étant pas spontané entre les processus fils (PASTIS...) et le processus père (PhotoCloud), une boucle de contrôle d'évolution est réalisée dans le script MEL. Le critère de fin de boucle est évidemment très sensible et a été la cause de nombreuses instabilités de PhotoCloud pendant les premiers mois de programmation. Au final toutes les boucles de contrôles d'évolution de PhotoCloud sont fonction de l'état de processus. De ce fait on interroge le système d'exploitation lui-même pour savoir si le processus est fini. Il est alors qualifié de processus « Zombi » car le processus fils est dit « mort » bien que son père le croit encore « vivant ».

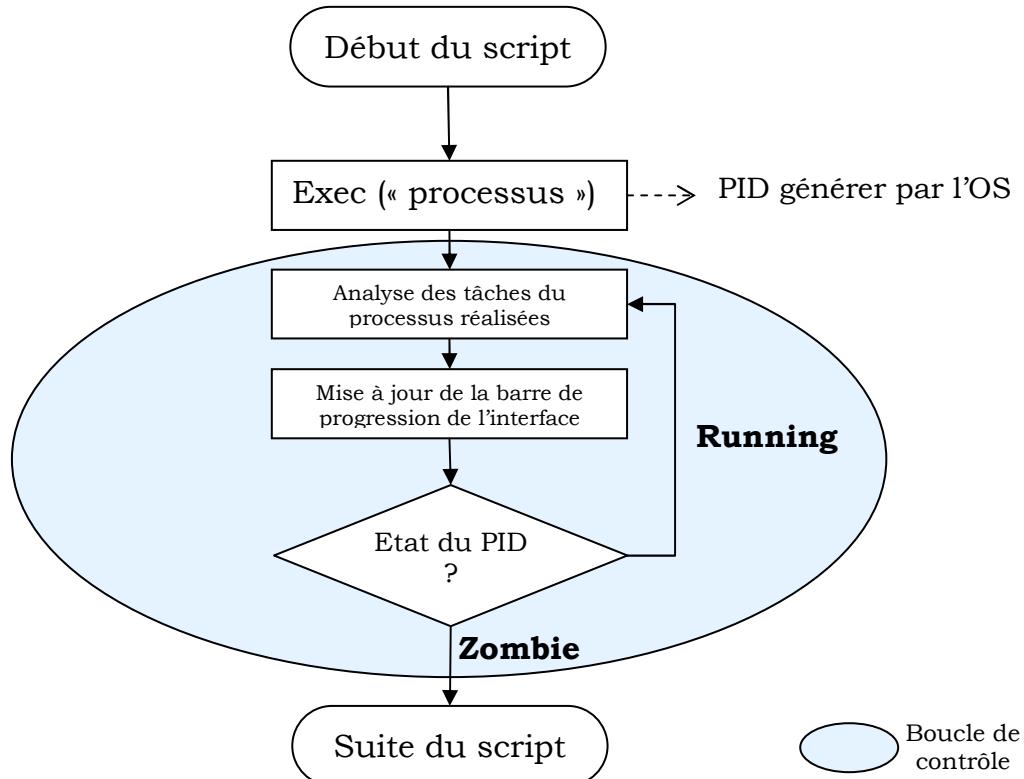


fig. 16 Logigramme d'analyse d'avancement d'un processus

2. NUBES Forma :

NUBES Forma est un outil développée par le laboratoire MAP GMSAU dans laquelle PhotoCloud a été intégré. C'est un plugin Maya écrit en script MEL et C++ qui est une aide à la modélisation d'œuvres architecturales dans Maya à partir de l'utilisation complémentaire de nuages laser et de photographies orientées.

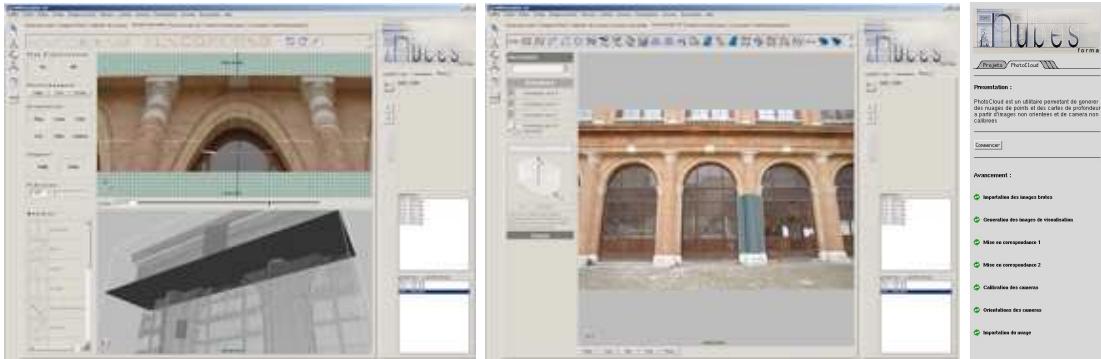


fig. 17 Intégration de PhotoCloud dans NUBES Forma

Dans le menu de droite de NUBES Forma a été inséré un onglet PhotoCloud qui présente le logiciel ainsi que l'historique des étapes réalisées :

- Importation des images brutes
- Génération des images de visualisation
- Mise en correspondance 1
- Mise en correspondance 2
- Calibrations des caméras
- Orientations des caméras
- Importation du nuage

Les données utilisées et générées lors du traitement par PhotoCloud sont contenues dans un répertoire pérenne inclu dans le dossier du Projet NUBES créé pour la modélisation.

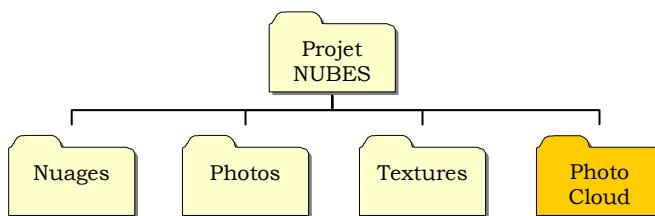


fig. 18 Structuration type d'un projet NUBES avec PhotoCloud

A la fin du traitement les nuages de points générés et les orientations des caméras sont convertis au format Maya (.ma) et placés dans les dossiers du Projet NUBES correspondants. Cet export permet notamment de pouvoir travailler par la suite sur n'importe quel type de distribution de NUBES Forma (sous plateforme Linux et Windows).

3. Traitement des images :

Les images acquises après un chantier sont au format RAW. Lors du stage les formats NEF de Nikon et CR2 de Canon ont été testés. Un certain nombre de prétraitements sur ces images sont effectuées afin d'être compatibles avec PASTIS et l'ensemble de la chaîne PAM.

a) Prétraitement

i. Détection des Focales

La focale des caméras et d'autres métadonnées sont contenues dans l'Exif (Exchangeable image file format) des images RAW. Ces informations sont extraites afin de structurer automatiquement le chantier et de générer les fichiers XML de calibration initiale des caméras. Les images sont ainsi renommées en ajoutant un préfixe spécifiant la focale associée.

ii. Conversion

Chaque image brute du chantier est ensuite débayérisée et convertie en trois versions :

- Une image Tiff 8 bit en niveau de gris par la commande MapCmd MpDcraw. Cette image va servir au traitement de PASTIS.
- Une image moyenne résolution en JPG pour la visualisation dans Nubes Forma et la saisie du masque pour MicMac. Cette conversion est réalisée avec le logiciel ImageMagick.
- Une image très faible résolution en JPG pour l'IHM de PhotoCloud. Cette conversion est également réalisée avec ImageMagick.

iii. Contrôle de l'avancement

Les conversions au format JPG sont des commandes unitaires de type *system()* (cf (1) de ce chapitre) comprises dans des boucles finies aux nombres d'itérations connues. Il n'y a donc pas de réelles difficultés pour rendre compte de l'état d'avancement de ces conversions.

Les conversions au format Tiff sont générées à partir de script en shell (script pour le système d'exploitation). Dans ce cas nous utilisons la méthode *exec()* en vérifiant la création des images dans le répertoire de PhotoCloud.

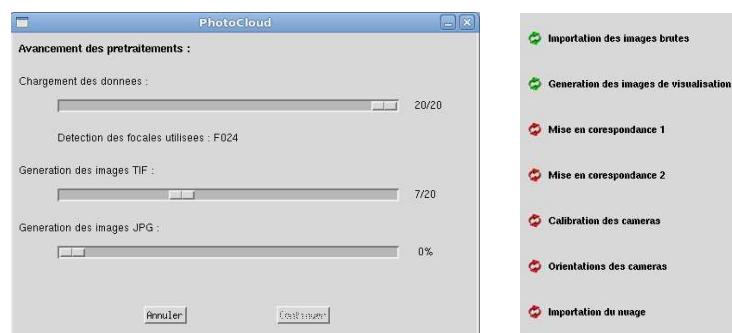


fig. 19 Avancement des prétraitements

b) Détection des points SIFT et calcul des homologues

i. Stratégie de calcul :

Les images sont maintenant prêtes à être traitées par PASTIS. Une console des paramètres est affichée à l'utilisateur.

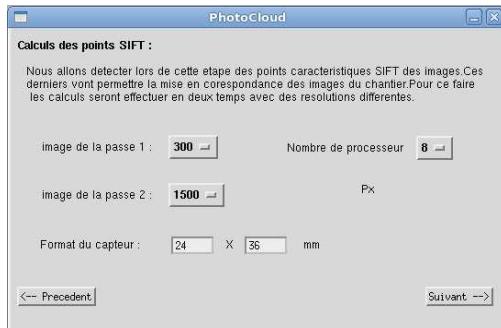


fig. 20 Fenêtre des paramètres de PASTIS

Afin de limiter le temps de calcul de la recherche des points homologues, PASTIS est utilisé deux fois avec des résolutions différentes.

La première passe utilise les images à faible résolution (entre 200 et 500 pixels de large) pour déterminer « rapidement » quelles images se recouvrent. Tous les couples d'images sont alors testés.

La seconde passe s'effectue à moyenne résolution (entre 1300 et 1700 pixels) et les couples d'images traités sont filtrés par les résultats de la première passe.

Ces calculs de correspondances sont de plus parallelisés pour optimiser le temps machine. L'utilisateur peut ainsi choisir combien de processeur vont être dédiés à l'application.

Le format de la matrice de la caméra est également demandé afin de convertir la longueur des focales, en millimètres dans l'Exif, en pixel pour la calibration.

ii. Contrôle de l'avancement

L'avancement de PASTIS est réalisé par la méthode `exec()`. L'analyse dans la boucle de contrôle utilise un tuyau pour chercher dans l'arborescence de PASTIS l'ensemble des fichiers homologues réalisés en temps réel.

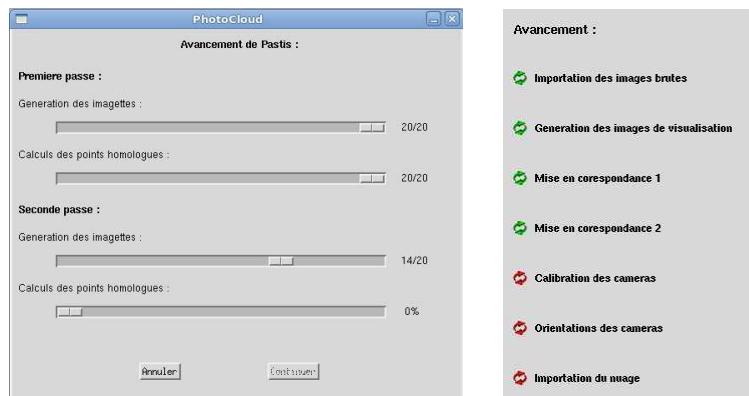


fig. 21 Avancement de la mise en correspondance

4. Calculs des calibrations et des aérotriangulations

a) Stratégie générale des calculs :

Un chantier type de PhotoCloud contient trois catégories d'images que l'utilisateur doit trier à partir de la banque d'images précédemment traité par PASTIS :

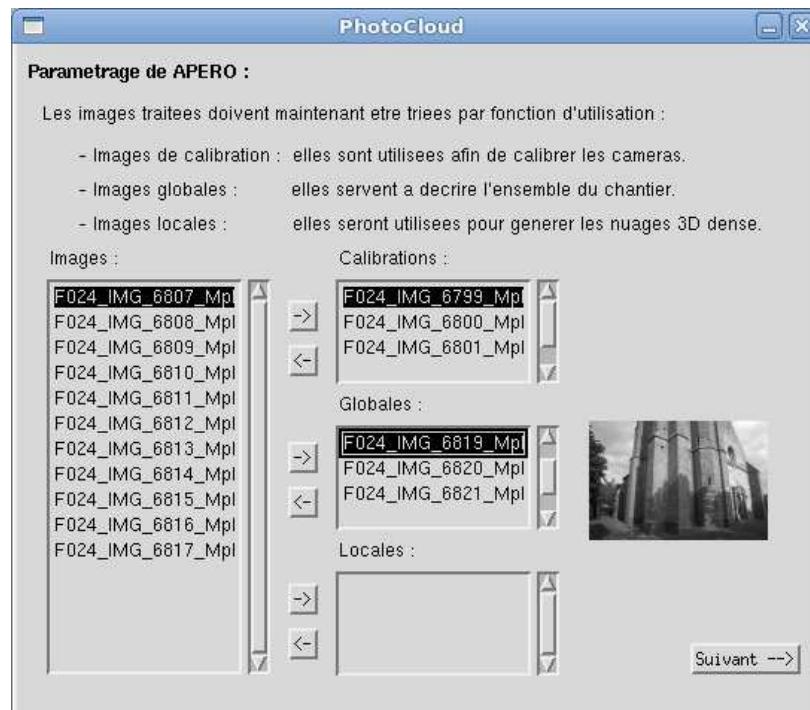


fig. 22 IHM de la gestion du chantier pour APERO

- Les images de calibrations :

Ces images vont être utilisées pour affiner les calibrations initiales. Chaque caméra constitue un petit jeu d'image qui est traité de façon isolée par APERO. Les calibrations affinées seront utilisées lors du calcul général du chantier pour limiter les risques de divergence.

- Les images globales :

Ce sont les images « supports » ou « passerelles » du chantier qui recouvrent l'ensemble de l'édifice à modéliser. Les points SIFT de ces couples d'images sont reprojetés en 3D afin d'obtenir un nuage de point 3D de prévisualisation au sein de NUBES Forma.

- Les images locales :

Les images regroupées dans ce bloc correspondent aux différents sites de corrélations du chantier qui seront traités par la suite avec MICMAC.

Les fichiers de paramètres XML d'APERO sont générés en fonction du tri réalisé et des focales qui nécessitent différentes méthodes de traitement (fisheyes et téléobjectifs).

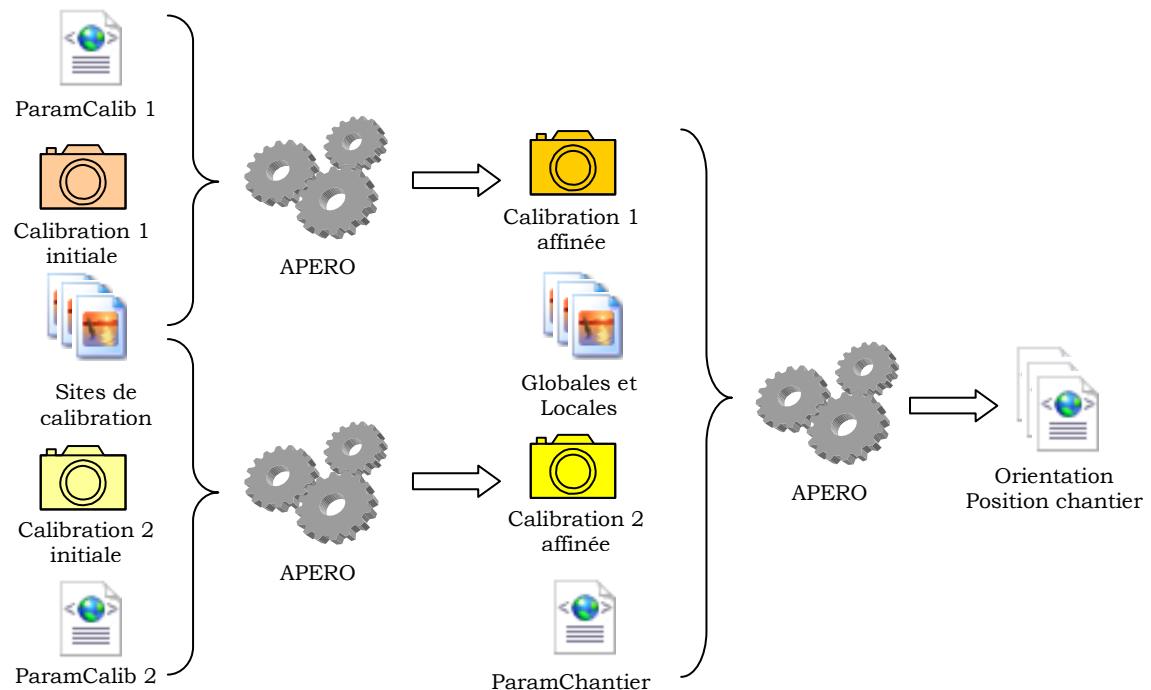


fig. 23 Exemple de séquence d'utilisation d'APERO par PhotoCloud

b) Le fichier de paramètre :

Chaque calcul avec APERO nécessite un fichier de paramètres qui décrit l'ensemble du chantier considéré, les étapes de compensations et les résultats à exporter. Les principales balises XML du fichier sont :

- <SectionBDD_Observation> :

Dans cette section sont définis les points d'appuis et de liaisons du chantier. Dans le contexte de ce stage seules les balises correspondant aux points de liaisons sont renseignées.

- <SectionInconnues > :

Dans cette section sont référencés les calibrations des caméras du chantier et la liste images associées. La première image de la liste est positionnée arbitrairement dans l'espace.

- <SectionSolveur > :

Nous spécifions ici l'algorithme utilisé lors de la compensation dans APERO (cf Chap. II, 5, c).

- <SectionCompensation > :

Cette section est véritablement le cœur du paramétrage des différentes étapes de compensation et d'itération du calcul. De façon générale PhotoCloud réalise une première étape où les paramètres de calibration sont fixés puis le système libère par itération successive et par ordre de grandeur les paramètres de calibration.

c) Les différents cas de chantier

i. Les calibrations

Le paramétrage des fichiers de calibrations diffèrent grandement s'il s'agit d'un fisheye, d'un objectif de moyenne focale (entre 20 mm et 60 mm) ou d'un téléobjectif.

Les images prises avec un fisheye utiliseront un fichier de calibration comprenant 50 paramètres. Ainsi la phase de libération des paramètres de calibration est spécifique et requiert un temps de traitement plus long qu'avec le modèle radial.

Les images prises avec un téléobjectif sont parfois instable avec APERO. Ainsi la balise <SectionInconnues > comporte le jeu de calibration du téléobjectif mais également le jeu de calibration de l'objectif « moyen » du chantier.

ii. Le calcul du chantier

Les modes de rédaction du fichier de paramètre ont été élaborées pour être compatible avec des chantiers comportant :

- Un fisheye
- Un (ou des) objectif(s) de classe « moyenne »
- Un fisheye avec des objectifs de classe « moyenne »
- Des objectifs de classe « moyenne » avec des objectifs téléobjectifs
- Un fisheye avec des objectifs de classe « moyenne » et des téléobjectifs

La principale différence entre ces modes est la présence ou non du fisheye pour la libération des paramètres des caméras lors des itérations.

d) Contrôle des calculs et de l'avancement

La phase de calibration des caméras est totalement indépendante du calcul de l'aérotriangulation globale du chantier. Cette caractéristique est préservée dans l'interface et permet un premier contrôle sur le bon déroulement des calibrations en présentant les résidus moyen après calcul.



fig. 24 Avancement des calculs d'APER0

i. Le contrôle des calibrations :

- Si les résidus sont inférieurs à 1 :

La calibration c'est bien déroulée et l'utilisateur peut cliquer sur suivant pour lancer le calcul d'aérotriangulation globale.

- Si les résidus sont entre 1 et 5 :

Dans ce cas il n'y a peut être pas eu suffisamment d'itérations pour les compensations et l'utilisateur peut itérer le calcul. S'il y a convergence le calcul global peut être lancé sinon il faut analyser plus précisément le problème (voir le cas ci-dessous).

- Si les résidus sont forts :

Cette situation montre qu'il y a un problème dans la structuration des données. Pour résoudre cette situation l'utilisateur a la possibilité d'accéder au journal des calculs d'APERO via le bouton paramètres.

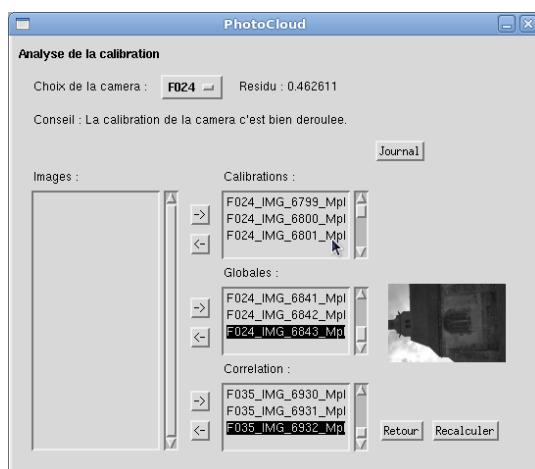


fig. 25 Analyse de la calibration

La fenêtre affichée permet de choisir la caméra à étudier, de voir son journal et de restructurer au besoin le bloc de calibration.

```
7 F024_209_6734_MpDcraw8B_GB.tif[1] ; Pere : F024_209_6737_MpDcraw8B_GB.tif
8 Times 1 Pds -1e+40MUL 0 0 2
9 NO BEST CAM
10 UN-Connected : F024_209_6733_MpDcraw8B_GB.tif
11 UN-Connected : F024_209_6735_MpDcraw8B_GB.tif
```

fig. 26 Exemple de journal

Le journal permet de détecter si une image n'est pas connectée au reste du chantier (UN-Connected) ou si une image perturbe (à tort ou à raison) le calcul avec de fort résidus. L'analyse à faire est donc un raisonnement utilisant les informations du journal et la visualisation des images concernées.

ii. Le contrôle du calcul global

Le contrôle du calcul global suit la même démarche que celle présentée pour les calibrations. Le résidu moyen du calcul est affiché en temps réel pour suivre l'évolution du calcul qui peut durer des heures dans le cas de gros chantier (cf 7).

iii. Contrôle de l'avancement

Le contrôle de l'avancement d'APERO a été réalisé avec la méthode `exec()`. Le processus lancé fait appel à APERO avec le fichier de paramètre associé et il est demandé au système d'exploitation de rediriger le flux de sortie dans un fichier texte. Ce document est en fait le journal de calcul présenté plus haut.

L'évaluation de l'avancement va ainsi être fonction de l'itération en cours de traitement dans le journal.

5. Exportations des relévements et des points SIFT3D

A la fin du calcul global du chantier les caméras sont exportées directement dans Maya ainsi que les points SIFT reprojetés en 3D provenant des couples d'images du bloc « Globale ». Ce premier nuage de point a une vocation de prévisualisation du chantier en 3D.

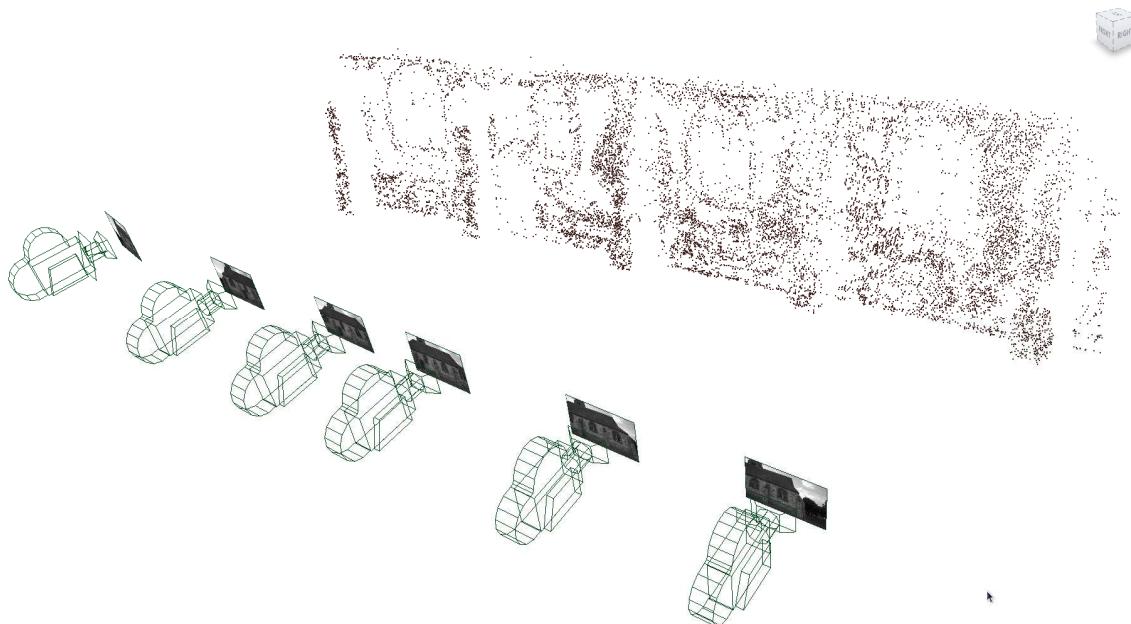


fig. 27 Capture d'écran de Maya après l'exportation des résultats d'APERO

Les fichiers générés sont au format .ma (Maya Ascii) et ils sont copiés dans le répertoire générique du projet NUBES Forma. Ils définissent des systèmes de particules pour les nuages de points et un descriptif des caractéristiques des caméras pour les prises de vues. Nous sommes ainsi à cette étape dans une condition similaire à un traitement « classique » de NUBES Forma avec un nuage de point et des images orientées dans un même système de coordonnées.

Calculs des points SIFT3D :

Les points SIFT3D ne sont pas directement exportés par APERO. J'ai donc programmé un petit logiciel extérieur, SIFT3D, codé en C++ à l'aide de Qt creator. Ce programme utilise pour le calcul la bibliothèque développée par le laboratoire du MATIS. Ainsi les différents objets photogrammétriques utilisés dans SIFT3D sont directement cohérents avec les données générées par la chaîne PAM.

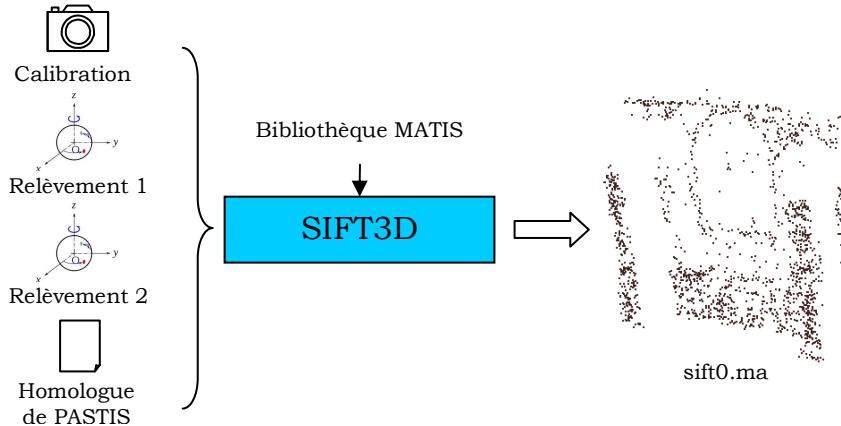


fig. 28 Principe du fonctionnement de SIFT3D

6. La corrélation dense

Une fois l'aérotriangulation réalisée, toutes les images du bloc « Locales » sont positionnées dans un même référentiel. Ainsi il n'est pas nécessaire de traiter d'un coup tous les sites de corrélation du chantier. Il a été choisi de pouvoir les traiter « à la demande ».

Ainsi un nouvel onglet a été ajouté dans la barre d'outils de NUBES Forma pour accéder aux sites de corrélation de PhotoCloud.

a) Présentation de l'interface



fig. 29 Interface des sites de corrélation de PhotoCloud

A gauche de l'interface se trouve « l'arbre de corrélation » des sites du chantier. Les images maîtresses sont les branches de l'arbre et les feuilles sont les images associées au site de corrélation. Il est automatiquement généré en fonction des positions des caméras et du protocole d'acquisition.

Le principe de construction de l'arbre est le suivant :

- 1) La première image du bloc « image locale » est par défaut une image maîtresse.
- 2) La seconde image est nécessairement une image du site de corrélation suivant le protocole. On détermine ainsi une mesure de la base du site.
- 3) Si l'image suivante est à une distance entre 80% et 120% de la mesure faite en 2) on la garde dans le site et on itère 3). Sinon un nouveau site est détecté et on repasse à 1).

L'arbre est également modifiable par l'utilisateur après génération dans le cas où il y aurait des erreurs de construction.

La zone centrale affiche l'image sélectionnée dans l'arbre. Quand il s'agit d'une image maîtresse un bouton de saisi de masque est alors affiché ainsi qu'un bandeau supérieur présentant les images filles du site de corrélation. Ceci facilite le contrôle de la structure et l'acquisition du site.

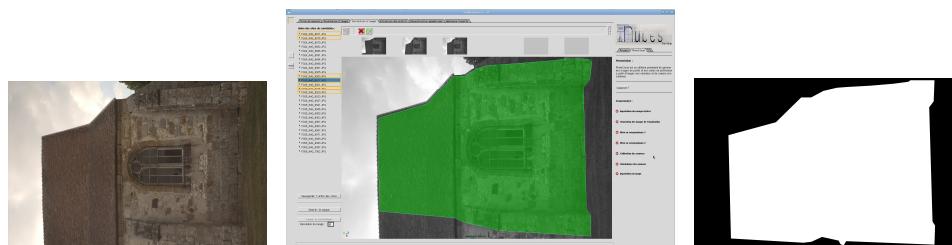


fig. 30 Saisie d'un masque de corrélation

Le masque est ensuite sauvegardé et dans un dernier temps le calcul de corrélation est lancé. L'utilisateur a la possibilité de choisir quelle est la densité du nuage de points 3D généré. Cette mesure est fonction de la résolution de l'image maîtresse.

b) Programmation de l'IHM

L'interface pour la saisie de masque dans NUBES Forma utilise des outils et des objets de Maya qu'il a fallu apprendre à manipuler. La zone de dessin de masque présentée comme un élément 2D de l'interface est en réalité un viewer 3D de Maya.

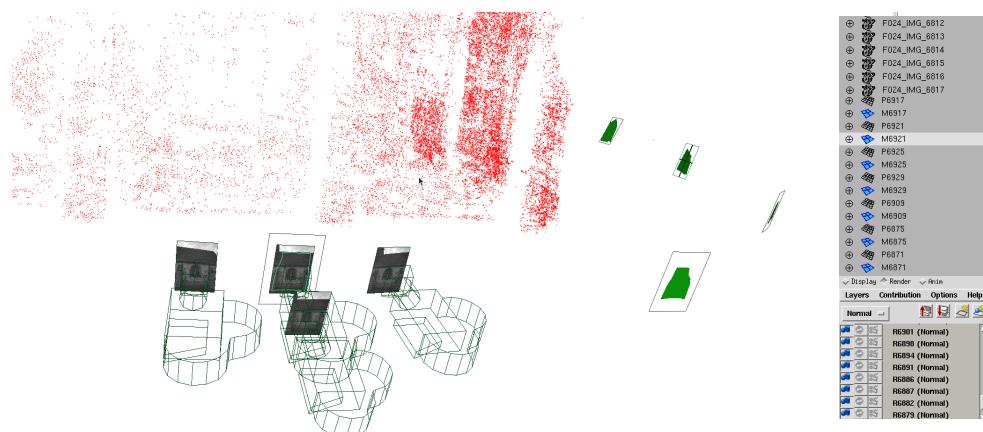


fig. 31 Les objets de Maya pour la saisie d'un masque

Pour chaque image maîtresse de l'arbre de corrélation est associé un plan « aimanté » sur lequel l'outil de dessin de polygone est fixé. L'image maîtresse est également munie d'une couche de rendu qui permet de filtrer seulement la visualisation du masque de corrélation correspondant. Enfin la caméra du viewer prend la position et l'orientation de l'image maîtresse.

c) Pilotage de MicMac

Pour lancer un calcul de corrélation MicMac a besoin d'un masque au format TIF binaire non compressé et d'un fichier de paramètre XML.

Le masque est généré par le calcul de rendu de Maya dont on extrait la couche Alpha. La compatibilité du format image est ensuite assurée par une conversion avec Imagemagick.

La stratégie de calcul contenue dans le fichier de paramètre de MicMac est relativement identique d'un site de corrélation à un autre car les conditions d'acquisition sont similaires. La définition d'un site est automatiquement rédigée à partir de l'arbre de corrélation.

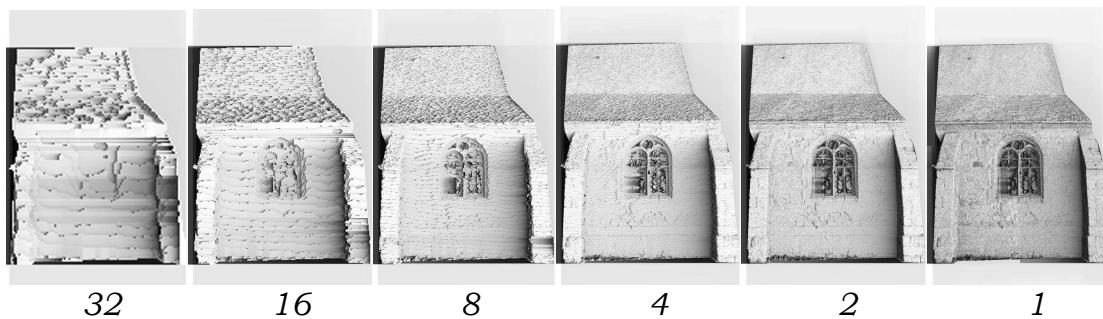


fig. 32 Surface calculée sur les 6 étages de la pyramide

La pyramide d'image utilisée a six niveaux de résolution (de 32 à 1). Les paramètres de recherche (cf. fig 9) et de découpe en dalles sont également fixés pour faciliter au maximum l'utilisation par l'opérateur. Ces paramètres ont principalement un impact sur le temps de calcul des cartes de profondeur et la finesse de la quantification de l'espace.

L'opérateur peut choisir quelle densité du nuage de point il désire lors de la conversion de la carte de profondeur.

d) Contrôle du calcul

Le contrôle du bon déroulement du calcul de MicMac est essentiellement visuel. A la fin du calcul MicMac génère une image du score de corrélation qui permet d'évaluer la fiabilité des zones du nuage de point générée. Un calcul de la surface ombragée est également accessible afin d'appréhender rapidement l'aspect du nuage de points.



fig. 33 Images de contrôle de MicMac

e) Contrôle de l'avancement

Le contrôle de l'avancement de MicMac s'effectue avec la méthode `exec()`. Tout comme pour APERO, le flux de sortie est redirigé vers un fichier texte et la boucle de contrôle teste quel niveau de la pyramide d'image est en cours de calcul.

7. Performance de PhotoCloud :

Les chantiers traités au cours du stage ont fait l'objet d'analyses quantitatives et qualitatives. Nous nous intéressons dans ce chapitre à des considérations photogrammétriques mais également matérielles telles que l'espace mémoire pris par un chantier ou les temps de calcul.

a) Les résidus

Les chantiers tests du stage ont eu après traitement par PhotoCloud des résidus subpixelaires.

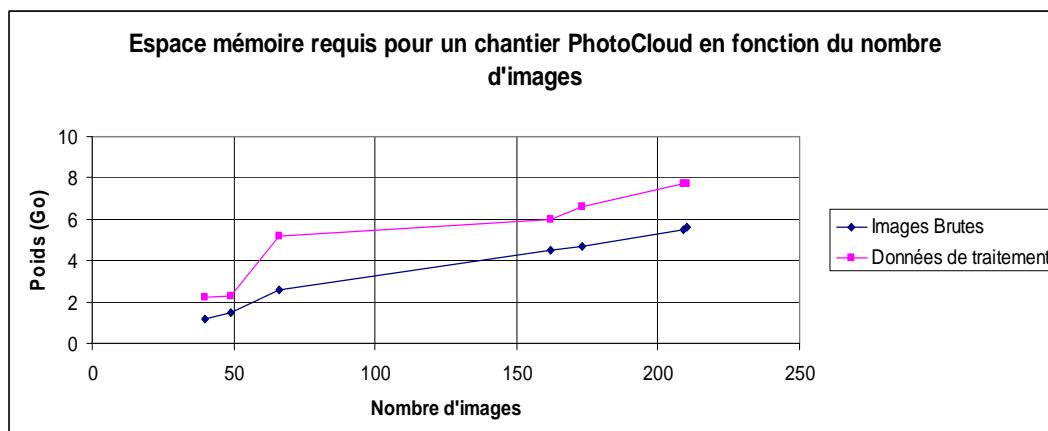
	Nombres d'images	Focales utilisées	Résidus calibration	Résidus chantier
Fresque	40	20 mm	0,62	0,87
Saint Jean	66	20 mm	0,74	0,67
Rampillon	162	24 et 35 mm	0,48 et 0,52	0,65
Ajaccio1	173	15 mm	0,77	0,89
Ajaccio2	209	15 ; 35 et 100 mm	0,64 ; 0,44 et 0,56	0,87
Fontains	210	24 ; 35 et 50 mm	0,57 ; 0,69 et 0,83	0,65

Ces résultats sont convaincants mais ils sont sous réserve d'une acquisition suivant le protocole établi et les types de surfaces photographiées (cf le problème d'Ajaccio).

Dans le cas de la configuration Ajaccio2 j'ai constaté que MicMac avait du mal à corrélérer les sites pris au fisheye malgré les « bons » résidus d'APERO. D'autres tests devraient être effectués dans ce contexte pour évaluer la robustesse de PhotoCloud.

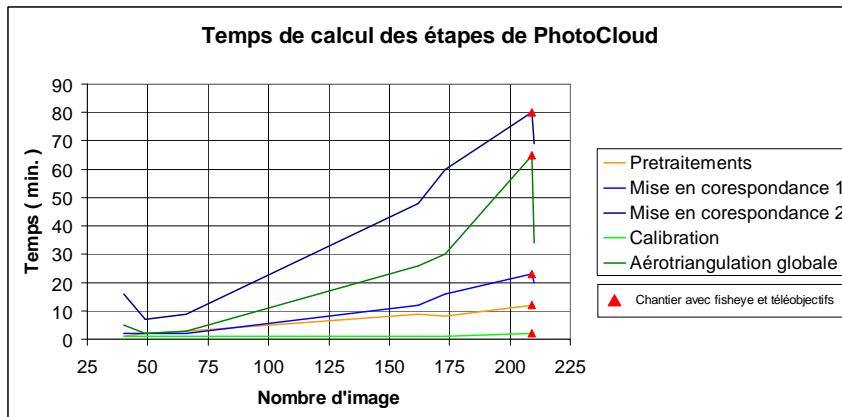
En revanche il n'y a pas eu de problème particulier avec les sites de corrélation d'Ajaccio1.

b) Espace mémoire

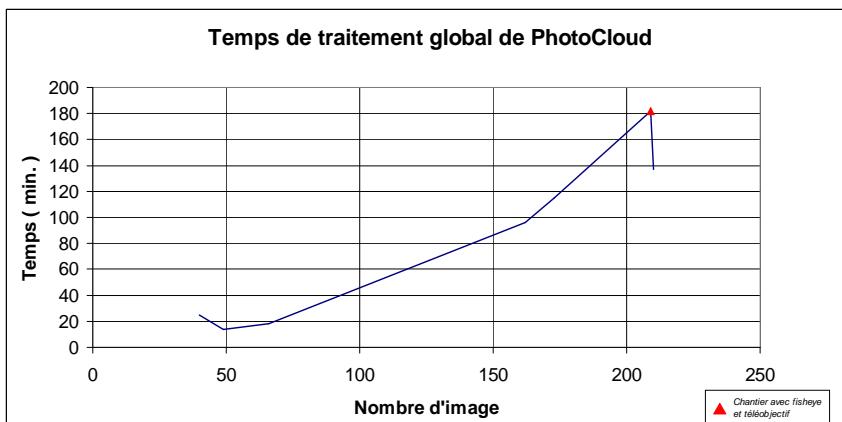


L'espace mémoire est important à anticiper avant d'aller sur le terrain afin de s'équiper en conséquence. Je présente ici également l'espace utilisé sur les ordinateurs pour un traitement par PhotoCloud.

c) Temps de calcul et de chargements



Les différentes étapes de PhotoCloud ont été chronométrées afin de pouvoir évaluer et intégrer dans une prochaine version de l'interface une estimation du temps des calculs. Cette mesure dépend principalement du nombre de photographies du chantier et des caractéristiques de l'ordinateur sur lequel PhotoCloud est lancé. On peut remarquer que la présence d'un fisheye dans le chantier augmente le temps de calcul.



Les mesures ont été effectuées sur un ordinateur avec 8 processeurs ayant une fréquence de 2,67 Ghz et une mémoire vive disponible de 5,8 Gbit. Dans ces conditions le temps de calcul pour obtenir le relèvement d'un chantier suit une loi du type :

$$\text{Temps du traitement} = 0,3 \text{ Nbi} + 0,0015 \text{ Nbi}^2$$

Cette règle est bien sûr très grossière vu le peu de points mesurés et la seule variable prise en compte (Nombre d'image) mais elle est toutefois présentée ici pour avoir un ordre de grandeur.

Le temps de calcul de la corrélation dépend principalement de la résolution de l'image maîtresse, du nombre d'images filles du site de corrélation, de la surface du masque et des ressources utilisables par l'ordinateur. De façon générale avec l'ordinateur du laboratoire le temps de calcul moyen d'un site est d'une dizaine de minute.

8. Exemple de modélisation à partir des résultats de PhotoCloud.

Je présente ici les premiers travaux de modélisation dans Nubes à partir d'un site de corrélation généré par PhotoCloud sur le chantier de Fontains :

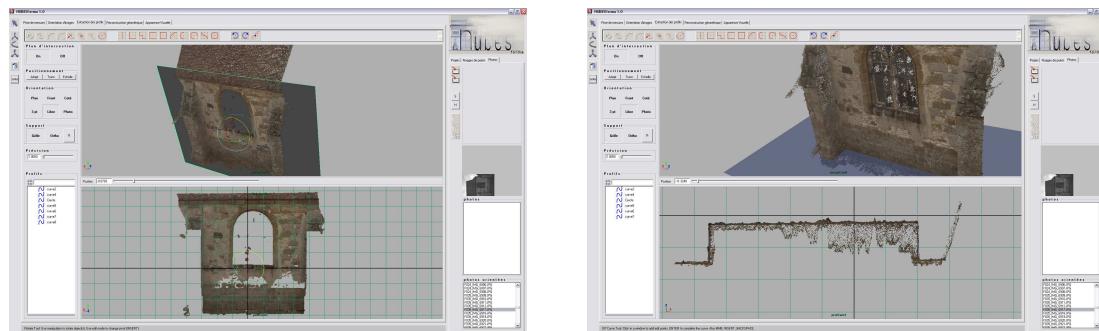


fig. 34 Extraction de profils

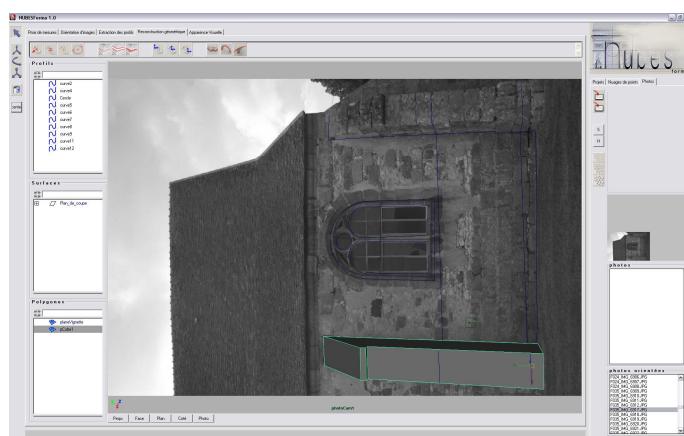


fig. 35 Génération de volumes

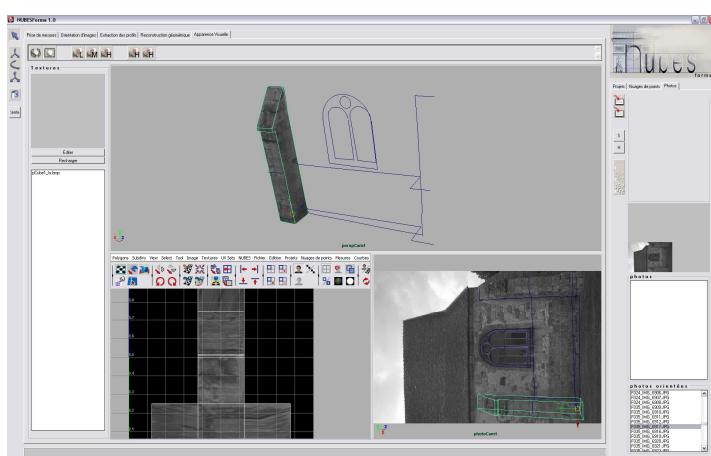


fig. 36 Extraction des textures

V.CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le stage au sein du laboratoire MAP GAMSAU m'a permis d'enrichir mes connaissances dans le domaine de la photogrammétrie classique et architecturale en utilisant des développements issus de la recherche et en expérimentant directement sur le terrain. J'ai également beaucoup appris dans le domaine informatique en découvrant le système d'exploitation linux, les problèmes de compilation et de librairies ainsi que la rédaction de script (shell et MEL). J'ai enfin apprécié de pouvoir transmettre sur le terrain et au laboratoire les techniques d'acquisition et de traitement aux membres de l'équipe du MAP GAMSAU.

PhotoCloud est une première version opérationnelle de l'intégration de la chaîne PAM dans Nubes. Il va être amené à évoluer rapidement en fonction des futurs chantiers et des tests qui seront menés par le laboratoire. Au début de septembre j'ai d'ailleurs travaillé en collaboration avec Nicolas NONY, un stagiaire, qui est à l'heure actuelle en train d'expérimenter PhotoCloud. Vous trouverez en annexe son rapport dans la partie « Rapport d'un premier utilisateur ».

Une des évolutions qui pourraient être apporté à PhotoCloud serait par exemple d'ajouter un outil pour utiliser des points d'appui. Ainsi l'aérotriangulation ne serait plus nécessairement faite en l'air et il n'y aurait plus d'indétermination sur le facteur d'échelle des modèles.

VI. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et revues :

Haas, Jean-François [2004] Mathématiques de la photogrammétrie numérique

Lowe, David [2004] *Distinctive image features from scale-invariant keypoints* International Journal of Computer Vision

MATIS [2010] *Détection et mise en correspondance de points d'intérêt.*

Pierrot-Deseilligny, Marc [2007] *MicMac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique.* Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°77

Sites Internet :

- <http://download.autodesk.com/us/maya/2009help/index.html> :
Le site officiel de MAYA pour découvrir les différents moyens de réaliser un plugin.
- <http://www.map.archi.fr/3D-monuments/index.html>
Site officiel du projet 3D monuments.

VII. ANNEXES :

Les annexes présentées sont contenues dans le Cdrom associé au rapport.

1. Rapport d'un premier utilisateur

Ce document est le rapport de Nicolas NONY, étudiant en conservation et restauration du patrimoine bâti, que j'ai encadré pour découvrir l'acquisition d'un chantier photogrammétrique et le traitement des données par PhotoCloud.

2. Details de prise de vue sur les chantiers du stage

Ce Document regroupe les prises de vues effectuées sur les chantiers avec leurs dispositions. Ils servent d'exemples d'application du protocole présenté dans le corps de ce rapport.

3. Documentation sur le paramétrage de la chaîne PAM

Cette documentation a été rédigée durant le premier mois de stage pour faire un bilan détaillé sur le paramétrage des logiciels de la chaîne PAM. Elle a ensuite servi de support et d'aide à la rédaction automatique des fichiers XML de paramétrage par PhotoCloud.

4. Guide Programmeur

Ce guide présente plus en détails les différentes fonctions qui ont été développées et l'architecture générale du logiciel PhotoCloud.

5. Codes Sources

Ce sont les codes sources MEL de PhotoCloud et C++ de SIFT3D.