Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA
Spécialité TOPOGRAPHIE

Géolocalisation par photogrammétrie des désordres d'ouvrages d'art sur des images acquises par un drone d'hélicoptère

Présenté le : **17 septembre 2008** par **Noémie VANETTI**

Réalisé au : **LCPC – Section « Traitement d'images et Géolocalisation »**
Route de Bouaye BP4129
44341 BOUGUENAIS Cedex

Encadrants LCPC :
M. PEYRET - Directeur de recherches
Mme CHAMBON - Chargée de Recherches
M. NICOLLE - Technicien supérieur

Correcteurs INSA :
M. GRUSSENMEYER
M. FERHAT

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de stage, François Peyret, qui m'a accueillie dans d'excellentes conditions pendant ces 24 semaines au sein de la section « Traitement d'Images et Géolocalisation ». Ces remerciements s'adressent également à mes encadrants, Sylvie Chambon et Philippe Nicolle, qui m'ont apporté de nombreux conseils et ont largement contribué à la réussite de ce stage. Je remercie, de plus, l'ensemble de la section « Structure et Instrumentation Intégrée » et notamment, Jean-luc Sorin et François Derkx pour les expérimentations réalisées avec le drone.

Merci à tous mes professeurs de l'INSA qui m'ont permis d'atteindre ce niveau d'étude et m'ont soutenue dans mes projets. Un merci plus spécifique à mes deux correcteurs, Pierre Grussenmeyer et Gilbert Ferhat, pour leurs remarques avisées et leur accompagnement durant ce stage.

Mes remerciements s'adressent également à ma famille et mes amis qui m'ont accompagnée et soutenue sans relâche durant toutes ces années d'études.

Je remercie aussi tous les chargés de relecture qui ont pris le temps d'examiner mon travail et de me transmettre leurs remarques.

SOMMAIRE

Introduction....1

I. Contexte de l'étude....4
I.1. Méthodes d'inspection des ouvrages d'art....4
I.2. Projet PMI (Plate-forme Mobile Instrumentée)....6
a) Définition du projet....6
b) Drone d'hélicoptère....6
c) Équipements embarqués....7
I.3. Présentation du travail réalisé par B. Cannelle....7
a) Logiciel « Interface »....8
b) Théorie des graphes....9
c) Détection de points de liaison....10

II. Présentation de la méthode mise en œuvre pour un chantier de géolocalisation....12
II.1. Particularité de la photogrammétrie appliquée au drone....12
a) Principes fondamentaux de la photogrammétrie....12
b) Photogrammétrie combinée pour le drone....13
II.2. Méthodologie pour un chantier de géolocalisation....16
a) Objectifs....16
b) Description de la méthodologie....17

III. Évolution du logiciel de géolocalisation....19
III.1. Analyse et traitement d'images pour une reconnaissance automatique de cibles....19
a) Algorithme développé pour la reconnaissance de cibles....19
b) Évaluation de la méthode développée....21
III.2. Restitution photogrammétrique des désordres d'ouvrages....22
a) Méthodes de restitution....22
b) Améliorations apportées....24
III.3. Analyse quantitative des données traitées....25
III.4. Algorithme de compensation....27
III.5. Documentation utilisateur....28

IV. Mise en place d'un site de tests....29
IV.1. Objectifs du site de tests....29
a) Maîtrise des vols du drone d'hélicoptère....29
b) Étude de précision....29
c) Calibration de nouveaux matériels....29
IV.2. Mise en place....30
a) Choix du lieu....30
b) Installations....30
c) Repères topographiques....33
IV.3. Expérimentations....33
a) Étude photographique....33
b) Réalisation du chantier test....35

V. Évaluation de la précision de la géolocalisation....44
V.1. Analyse des résultats....44
a) Évaluation de la qualité des images....44
b) Analyse du calcul d'orientation externe....45
c) Analyse des coordonnées obtenues par restitution....46
V.2. Étude de précision....47
a) Bilan des erreurs....47
b) Calcul de précision....47
V.3. Comparaison avec Photomodeler....52

Conclusion....54
Perspectives....55

Liste des figures....57
Liste des tableaux....59
Liste des équations....60

Bibliographie....61

Annexes....62

Notations et sigles utiles

Pour la bonne compréhension de ce mémoire, il est donné les différentes notations utilisées tout au long de cette présentation :

(e, n) : coordonnées d'un point dans le plan de l'image (pixels)

(X, Y, Z) : coordonnées tridimensionnelles d'un point dans le repère terrain (mètres)

(X_0, Y_0, Z_0) : position des centres de prises de vues de la caméra exprimée dans le repère terrain

(ω, φ, κ) : angles d'Euler définissant l'orientation de l'image, aussi appelés attitude

R : matrice de rotation permettant de passer du repère caméra vers le repère terrain

c : focale de la caméra

On donne également la signification des sigles utilisés :

CCD : Charge-Coupled Device

GPS : Global Positionning System

IGN : Institut Géographique National

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

PMI : Plate-forme Mobile Instrumentée

PPS : Point Principal de Symétrie

RGF93 : Réseau Géodésique Français 1993

SIFT : Scale Invariant Feature Transform

WGS84 : World Geodesic System 1984 associé au système GPS

Glossaire

La **calibration** d'un appareil photo est le processus qui permet de déterminer les caractéristiques de l'appareil (distorsions, focale, coordonnées du PPS...). Le LCPC, qui possède une équipe de recherche en traitement d'images, a développé un logiciel de calibration (Calcam). Il permet d'effectuer deux types de calibrations : celle de Tsai [1987] et celle de Zhang [1998].

Un **point d'appui** est un point qui possède à la fois des coordonnées dans le système terrain et dans le système image et qui apparaît dans au moins deux images. Il servira aux calculs de compensation.

Un **point de contrôle** est un point qui possède à la fois des coordonnées dans le système terrain et dans le système image mais, contrairement au point d'appui, n'est pas utilisé dans les calculs de compensation. Ainsi les résidus sur les points de contrôle sont plus significatifs que ceux sur les points d'appui pour évaluer la précision de l'orientation des images.

Un **point de liaison** est un point qui possède des coordonnées images dans au moins 2 photos. Ce point image peut être issu aussi bien de l'objet à restituer que de l'environnement.

Deux points images sont dits **homologues**, lorsqu'ils sont issus d'un même point terrain.

On appelle **base** dans un couple photogrammétrique le vecteur qui relie les deux centres de prises de vues.

Un **faisceau** est la droite passant par un point image et le sommet de prise de vue.

La **compensation par faisceaux** est la résolution par moindres carrés du système d'équations dont certaines sont issues des observations réalisées sur les images (coordonnées-image) des points de liaison et des points d'appui, puis d'autres issues des observations (coordonnées-terrain) réalisées sur le terrain pour déterminer les positions des points d'appui. Les paramètres du système sont les coordonnées tridimensionnelles des points de liaison dans le système terrain ainsi que la position et l'attitude de chaque photo. Le système est résolu par moindres carrés itératifs et des solutions approchées pour la position et l'attitude des clichés sont nécessaires afin d'initialiser le système.

Introduction

Présentation du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) est aujourd'hui un organisme public national de recherche non seulement au service de l'Etat, mais aussi des collectivités territoriales. Son action concerne les domaines du génie civil, des transports, du génie urbain et de l'environnement. Il a toutefois subi plusieurs évolutions et pris divers statuts depuis sa création.

En 1831, l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) crée son premier laboratoire de recherche. Le ministère chargé des travaux publics rend alors en 1949, ce laboratoire autonome en lui conférant le statut de service déconcentré : le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées s'installe à Paris. En 1975, une partie du LCPC se délocalise sur Bouguenais, au sud de Nantes puis en 1990, le LCPC s'associe avec le CNRS pour former le Laboratoire des Matériaux et des Structures de Génie Civil (LMSGC) à Marne-la-Vallée. Enfin, en 1999, le LCPC et l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS) créent une unité mixte dénommée le Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructures-Conducteur (LIVIC).

Le LCPC est aujourd'hui partagé sur trois sites: Paris, Bouguenais (Nantes) et Marne-la-Vallée. Il s'appuie sur le Réseau des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC), intégrés dans les Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) et s'étendant sur l'ensemble du territoire français.

La création du site de Bouguenais au milieu des années soixante-dix a permis au LCPC d'installer les plus grands des « équipements remarquables » dont il avait besoin pour mener ses recherches, notamment une centrifugeuse géotechnique, un banc de fatigue des câbles pour ouvrages d'art, un manège de fatigue des chaussées ou encore une piste de référence pour les caractéristiques de surfaces des chaussées. Le LCPC de Nantes abrite 8 unités de recherche (plusieurs se partagent entre Paris et Nantes) et 250 agents. Presque la moitié des effectifs globaux du LCPC y est affectée, soit 85 ingénieurs et chercheurs, 130 techniciens et 35 personnels administratifs.

L'activité scientifique et technique du LCPC est organisée autour de cinq pôles (Géotechnique, Chaussées, Ouvrages d'art, Exploitation et sécurité routières, Environnement et génie urbain) et un domaine d'accompagnement (Sciences de l'Ingénieur).

Par ailleurs, le LCPC développe de nombreux partenariats aux niveaux national, européen et mondial. Sur le plan national, il s'agit notamment du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'Ecole des Ponts et Chaussées (ENPC) et de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS). A l'échelle européenne, on peut citer le Forum des Laboratoires de Recherches Routières (FERHL) dont le LCPC est membre. Le laboratoire s'implique également dans les programmes de Recherche et Développement de l'Union Européenne. Au niveau mondial, on retrouve le LCPC dans les pays du Maghreb, en Amérique latine, en Amérique du Nord et au Japon.

Au sein du LCPC, la division « Métrologie et Instrumentation » dans laquelle s'est déroulé mon PFE, a pour rôle de concevoir des matériels de mesure, d'acquisition et de traitement de données et d'images. Elle mène des activités de recherche propres dans ses domaines de compétence, seule ou plus généralement en partenariat, mais est également au service des autres unités de recherche et fournit différentes prestations. On peut citer notamment, le conseil et l'aide à la rédaction de cahiers des charges, les études de faisabilité et la réalisation de prototypes (recherche et développement) ou des essais vibratoires et climatiques.

Cette division transverse est composée de 4 sections réparties sur les sites de Nantes et de Paris. A Nantes, l'équipe se compose d'une vingtaine de personnes réparties en 3 sections : Structures et Instrumentation Intégrée (SII), Imagerie et Géolocalisation (IG) et Métrologie-Qualité (MQ). A Paris, une dernière section Modélisation et Conception des Systèmes d'Instrumentation (MCSI) vient s'ajouter à la division pour compléter son éventail de compétences.

Concernant le projet de la Plate-Forme Instrumentée (PMI) du LCPC sur lequel s'appuie mon PFE, il est né à la fin des années 1990 et s'est concrétisé en 2005 avec l'achat d'un drone d'hélicoptère. Ce projet est transversal et concerne plusieurs sections de la division « Métrologie et Instrumentation ». Sur le site de Nantes, la section « Structures et Instrumentation Intégrée » dirigée par Louis-Marie Cottineau, offre principalement ses compétences en électronique, en mécanique industrielle et en traitement de signal ce qui permet de gérer les acquisitions et transmissions d'informations du drone avec l'utilisateur et de maîtriser les diverses commandes pour le diriger. La section « Imagerie et Géolocalisation » dirigée par François Peyret s'occupe, quant à elle, des traitements d'images comme le déflouage des photos acquises par le drone, l'exploitation de détecteurs d'objets dans une scène ou de points homologues entre photos ainsi que l'utilisation d'algorithmes de corrélation et autres. D'autres personnes travaillent également sur la géolocalisation en utilisant principalement le GPS (*Global Positionning System*) ou différents types de capteurs pour modéliser des trajectoires et localiser des objets mobiles.

Démarche et objectifs du PFE

La problématique principale de ce projet est de développer et de valider une méthode permettant de géolocaliser, par photogrammétrie, des désordres d'ouvrages d'art observés sur les images acquises par le drone d'hélicoptère du LCPC. A celle-ci s'ajoute également une forte contrainte d'automatisation due au fait que les utilisateurs ne sont pas des spécialistes en photogrammétrie et que le chantier peut contenir plusieurs dizaines de clichés ce qui rend la chaîne de traitements relativement longue et fastidieuse lorsqu'elle est effectuée manuellement.

Ainsi, un premier besoin exprimé dans ce projet était de pouvoir déterminer de façon très précise les paramètres dimensionnels des désordres de l'ouvrage, notamment la taille des fissures. Après une étude du problème avec les participants du projet, il s'est toutefois avéré plus réaliste de s'intéresser tout d'abord à la précision qui pouvait être atteinte pour la géolocalisation de ces désordres puis d'envisager alors de déployer les dispositifs adéquats (passerelle, nacelle...) pour déterminer, au moyen d'une intervention humaine et d'un matériel de précision, les caractéristiques de ceux-ci. En effet, l'intérêt d'utiliser un drone pour inspecter les ouvrages d'art est avant tout pour pallier un problème économique car l'installation d'une passerelle ou le blocage d'une voie coûte très cher. Réaliser une pré-inspection à l'aide des images aériennes acquises par le drone permet de ne mettre en place les « grands moyens » que lorsqu'un risque potentiel a pu être identifié et localisé à un endroit précis de l'ouvrage.

D'une approche plus technique, la problématique suggérée par ce projet est donc l'exploitation approfondie des données fournies par les différents équipements du drone (appareil photo, caméra, GPS, centrale inertielle...) ainsi que la mise en place d'une chaîne photogrammétrique simple qui aboutisse à la détermination des coordonnées tridimensionnelles des désordres qui auront été identifiés sur les photographies de l'ouvrage.

En 2007, un stagiaire de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques ENSG, Bertrand Cannelle, a travaillé sur la problématique de la PMI et a proposé une première ébauche d'un logiciel appelé *Interface* qui permet de traiter les images acquises par le drone et de restituer des désordres d'ouvrages d'art. Les calculs développés dans ce logiciel se basent principalement sur des méthodes photogrammétriques d'aérotriangulation aérienne, appliquées toutefois à des cas de photogrammétrie terrestre (ouvrages d'art verticaux).

L'objectif de mon travail de PFE est donc de reprendre, dans un premier temps, le travail réalisé par B. Cannelle sur l'étude de géolocalisation des défauts puis, de poursuivre ses recherches selon plusieurs axes de travail afin d'atteindre une véritable maîtrise de notre instrument, le drone d'hélicoptère muni de sa Plate-forme Mobile Instrumentée (PMI), et de participer ainsi plus largement aux projets d'inspection des ouvrages d'art en France et même à l'étranger.

Cet objectif principal de géolocalisation peut se décomposer en plusieurs sous-objectifs qui structureront les différentes étapes de la démarche adoptée dans la réalisation de ce projet :

- Identifier clairement la demande et les types de chantiers sur lesquels une intervention avec le drone d'hélicoptère est adaptée ;
- Réaliser une méthodologie type pour le déroulement des chantiers de géolocalisation ;
- Réaliser une étude sur les caractéristiques offertes par l'appareil photo embarqué sur le drone pour décider des réglages permettant la meilleure acquisition afin d'éviter le problème des images floues ;
- Évaluer la précision possible à atteindre quant à la détection et à la géolocalisation de désordres grâce à la mise en place d'un site de tests ;
- Améliorer et compléter le logiciel *Interface* afin d'augmenter l'automatisation du processus photogrammétrique et de faciliter la gestion des données pour permettre un suivi plus régulier et mieux organisé des désordres observés sur l'ouvrage ;
- Valider et concrétiser les études sur le chantier pilote de la Vallée d'Aspe ;
- Promouvoir et former les personnes au logiciel créé pour les chantiers de géolocalisation.

Nous introduirons dans un premier temps, le contexte de l'étude par un état de l'art des méthodes actuelles d'inspection des ouvrages d'art ainsi qu'une présentation de l'existant pour le projet PMI. Une deuxième partie sera consacrée à la présentation de la méthode mise en oeuvre pour les chantiers de géolocalisation. Elle apportera ainsi une dimension plus théorique en exposant d'une part, la particularité de la photogrammétrie appliquée au drone puis, d'autre part, en proposant une méthodologie pour le déroulement d'un chantier. Une troisième partie permettra ensuite de proposer des améliorations pour le logiciel *Interface* dans le traitement des données. Il s'agira essentiellement d'une phase de recherche et développement sur le logiciel afin d'automatiser et d'optimiser les différents calculs de photogrammétrie et de traitements d'images. Une quatrième partie présentera enfin le projet de création d'un site de tests au LCPC et l'expérimentation réalisée sur celui-ci. Cette partie expérimentale permettra d'apporter une dimension pratique au projet avec l'objectif de tester notre outil en grandeur réelle. Enfin, une dernière partie analysera les résultats obtenus et permettra de réaliser une étude de la précision de géolocalisation. On donnera, pour conclure, le bilan des apports au projet ainsi que quelques perspectives envisageables pour l'avenir.

I. Contexte de l'étude

Cette partie présente dans un premier temps, un état de l'art des techniques actuelles qui sont utilisées pour l'inspection des ouvrages d'art. Elle explicite ensuite le projet innovant mené par le LCPC pour réaliser cette inspection à l'aide d'un drone avant de rappeler les principales recherches déjà réalisées sur le sujet et qui servent de point de départ pour ce PFE.

I.1. Méthodes d'inspection des ouvrages d'art

En France, près de 250 000 ouvrages d'art doivent être surveillés régulièrement pour s'assurer de leur intégrité. Comme le présente le document de Derkx et al [2002], actuellement, l'inspection est un examen visuel de l'ensemble de l'ouvrage. Pour cela, il est souvent nécessaire de mettre en place des équipements spéciaux tels que des passerelles automotrices, des nacelles ou autres matériels et de procéder parfois à des blocages de voies de circulation ou à des fermetures de routes, ce qui pose évidemment de nombreux problèmes pour la fluidité du trafic ainsi que pour la sécurité du personnel inspectant les ouvrages (cf. figures 1, 2 et 3).

Figure 1: Ruisseau sous autoroute

Figure 2: Ouvrage métallique

Figure 3: Inspection de l'ouvrage à l'aide d'une plate-forme

L'évaluation des ouvrages d'art se fait sur leur état apparent. D'après la méthode de gestion des ouvrages d'art proposée par Lacoste [2006], cette évaluation doit être quantifiée (système de cotation), réalisée pour tous les ouvrages classiques ou non et répétée avec une périodicité de 3 à 5 ans.

Sur le terrain, il est effectué un relevé des défauts et de leurs étendues (cf. figure 4) mais aucune interprétation ne doit être faite. L'analyse et la classification sont réalisées postérieurement grâce à un certain nombre de critères qui déterminent alors la priorité technique et socio-économique de l'ouvrage pour sa mise en réparation.

On répertorie quatre niveaux de désordres (D1 à D4 + D0). Pour chaque défaut observé, il est alors réalisé, grâce à l'aide apportée par le catalogue des anomalies, un : - procès-verbal détaillé (figure 5)
- tableau de synthèse (figure 6)

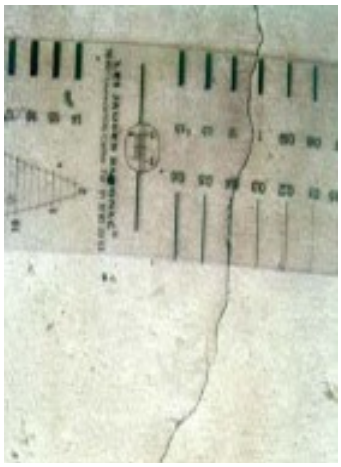


Figure 4: Mesure d'une fissure

Description des désordres	page	NE	Défauts Existe	Défauts Etendus	Désordres D0	D1	D2	D3	D4	Remarques
BANDEAUX										
4.1 Déformation dans la géométrie des bandeaux	77				X					
4.2 Fracture sur bandeau en extrados dans la zone des reins	77				X					
4.3 Décollement du bandeau / corps de voûte	77							X		
COUPS DE VOUTE										
4.4 Fractures longitudinales	79							X		
4.5 Fractures obliques	79				X					
4.6 Fracture transversale à la clé	79				X					
4.7 Fracture transversale entre naissance et reins	81				X					
4.8 Bombement ou déversement	81					X				
4.9 Renforcement par contre-voûte : dégradation	81									
4.10 Végétation	83		X							
4.11 Déjointement de surface	83									
4.12 Déjointement et descellement	83					X				
4.13 Ecoulement, efflorescence, concrétion	85				X					
4.14 Altération des pierres	85				X					

Figure 5: Procès-verbal

	Défauts ou désordres non évalués (NE)	Défauts	Désordres D0	D1	D2	D3	D4	Total des désordres examinés	Sécurité S
Equipements	3	5							3
Travée (0;1)	0	6	7	3	0	1	1	12	1
Travée (1;2)	0	1	8	1	2	1	0	12	0
Total Tablier	0	1	15	4	2	2	1	24	1
Culée 0	6	2	21	6	3	2	1	33	2
Pile 1	3	1	15	5	2	4	0	26	0
Culée 2	6	0	19	8	6	0	0	33	0
Total Appuis	15	3	55	19	11	6	1	92	2

Figure 6: Tableau de synthèse

Ces étapes préalables permettent de procéder à la classification de l'ouvrage qui consiste à effectuer :

- <u>un tri des ouvrages</u> :

Un premier tri général pour les ouvrages d'art est réalisé suivant 2 classes :

- la liste verte pour les ouvrages peu ou pas dégradés ;
- la liste rouge pour les ouvrages potentiellement dégradés.

- <u>une attribution d'indices d'état</u> :

Un second tri plus précis est ensuite réalisé pour chaque ouvrage grâce à un indice d'état IE de 1 à 8 :

- 1 : l'ouvrage ne présente aucun désordre ou des désordres infimes ;

- 2 : l'ouvrage présente des désordres mineurs et peu étendus ;

- 3 : l'ouvrage présente des désordres mineurs et étendus ou des désordres significatifs et peu étendus ;

- 4 : l'ouvrage présente des désordres significatifs et étendus ;

- 5 : l'ouvrage présente des désordres importants mais peu nombreux ;

- 6 : l'ouvrage présente des désordres préoccupants et/ou nécessitant une augmentation de la fréquence de la surveillance périodique ;

- 7 : l'état de l'ouvrage nécessite une surveillance renforcée ;

- 8 : l'état de l'ouvrage nécessite sa mise sous haute surveillance, à quoi s'ajoutent des mesures de sécurité immédiates ou des mesures de sauvegarde ;

- NE : l'état de l'ouvrage n'est pas évalué.

L'inspection détaillée de tous les ouvrages est donc une opération délicate et longue. Elle requière l'intervention de plusieurs personnes et l'installation d'équipements spéciaux. Cela rend donc la surveillance et la manutention des ouvrages très onéreuses, ce qui encourage à chercher d'autres solutions plus avantageuses.

I.2. Projet PMI (Plate-forme Mobile Instrumentée)

Pour présenter le projet du LCPC, nommé « Projet PMI », on donne un bref historique de la naissance de ce projet ainsi que de ses premières expérimentations. On présente également en détail l'acteur au coeur de ce projet, le drone d'hélicoptère, ainsi que les différents instruments qui l'équipent.

a) Définition du projet

Le projet concernant l'utilisation d'un drone est né à la fin des années 1990 et a été mis en pratique pour la première fois sur le viaduc de Saint-Cloud [DERKX-03], afin de valider les capacités d'un drone à voir des désordres dans des lieux d'accès difficiles, nécessitant des équipements spéciaux et dangereux pour les inspecteurs. Après cette expérimentation, le LCPC s'est muni de son propre drone en 2005. Depuis l'achat et jusqu'à maintenant, le laboratoire travaille à améliorer les capacités de son drone en ajoutant notamment de nouveaux équipements, en gérant les transmissions d'informations (photos et vidéos) du drone vers le poste de pilotage et en déterminant également le positionnement du drone afin de trouver des méthodes efficaces de contrôle des ouvrages d'art.

Malgré l'inexistence, à l'époque de l'achat du drone, d'outils permettant de traiter les photos prises par le drone, le LCPC a toutefois réalisé quelques chantiers qui ont été l'occasion de tester les potentialités du drone. Outre la mission réalisée sur le viaduc de Saint-Cloud, le LCPC effectua notamment un chantier commandité par EDF pour photographier plusieurs pylônes électriques puis un autre qui fut réalisé sur le pont de Tonnay-Charentes, dont la partie basse du pont est en pierre et la partie haute est constituée de câbles métalliques dont il était demandé d'examiner l'avancement de l'oxydation sur certaines zones.

Ce Projet de Fin d'Etude, en parallèle à d'autres projets sur le drone également en cours de réalisation, vient donc compléter le développement de techniques qui permettront de rendre les opérations du drone totalement opérationnelles. Ce PFE rentre dans le cadre de la tâche de géolocalisation des images à posteriori (tâche 1220 de l'organigramme présenté en Annexe 1) afin de pouvoir in-fine géolocaliser les désordres observés et fournir aux inspecteurs d'ouvrages des résultats qualitatifs et quantitatifs pour un suivi d'ouvrages de qualité.

b) Drone d'hélicoptère

Le drone acheté par le LCPC, illustré sur la figure 7, est un modèle réduit d'hélicoptère anciennement utilisé par les militaires. Le moteur utilisé pour la propulsion est un moteur thermique et une alimentation électrique est présente grâce à des batteries qui servent aux instruments de navigation, à la communication avec le sol et aussi aux équipements de la tourelle (Derkx&Sorin [2005]).

Le drone du LCPC possède les caractéristiques techniques suivantes :

- diamètre rotor : 1,80 m ;
- longueur : 1,70 m ;
- masse à vide : 8,5 kg ;
- masse maximum en charges : 15 kg ;
- charges utiles : 5,5 kg ;
- autonomie : 20 à 25 min.

Il possède aussi un certain nombre de capteurs :

- un récepteur GPS (mode naturel) ;
- une centrale inertielle 3 axes (3 accéléromètres et 3 gyromètres) ;
- un magnétomètre ;
- un altimètre.

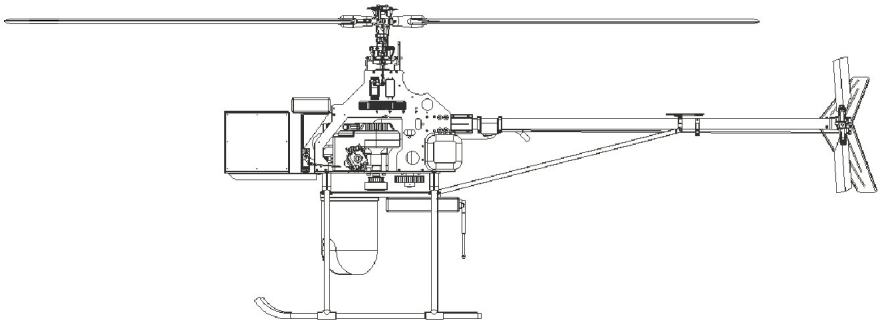


Figure 7: Drone d'hélicoptère du LCPC

Toutes les données relevées par les différents capteurs sont envoyées en temps réel vers l'auto-pilote du drone ce qui lui permet de calculer ses trajectoires et ses paramètres de stabilisation puis sont accessibles, après atterrissage, grâce au dépouillement de la boîte noire.

c) Équipements embarqués

Sous l'hélicoptère se trouve une plate forme qui peut se mouvoir selon 2 axes : l'axe vertical (angle de lacet ou *Yaw*) et un axe orthogonal (angle de tangage ou *Pitch*). Cette nacelle permet d'embarquer différents types d'équipements (cf. figure 8) permettant l'acquisition des données. Les restrictions sont l'encombrement, la consommation électrique mais aussi et surtout le poids.

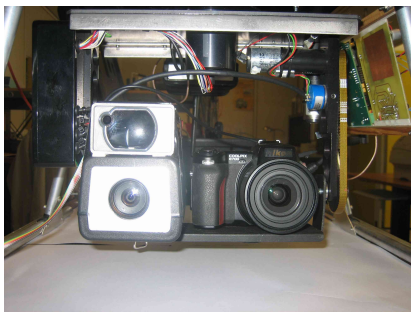


Figure 8: Equipements du drone

Les capteurs utilisés sont:

- ✗ un appareil photo NIKON Coolpix 8700 de 8 mégapixels ;
- ✗ une caméra SONY ;
- ✗ un télémètre laser LEICA.

Le détail de leurs caractéristiques est donné en annexe.

I.3. Présentation du travail réalisé par B. Cannelle

Dans le cadre de ce projet de géolocalisation des désordres d'ouvrages d'art proposé par le LCPC, un premier travail de recherche a été réalisé l'année dernière par Bertrand Cannelle [2007]. Il est donc intéressant, pour comprendre les tenants et les aboutissants de ce PFE, de revenir rapidement sur les principaux points déjà réalisés et servant de base à ce projet.

On décrit tout d'abord, la première version du logiciel de géolocalisation réalisé pour les chantiers du drone et on présente également l'utilité de la théorie des graphes pour le processus de photogrammétrie ainsi que l'intérêt de la méthode de détection des points de liaison choisie pour ce logiciel.

a) Logiciel « Interface »

Ce logiciel a été conçu dans le but de faire le lien entre les métiers des ponts et chaussées et ceux de la géomatique, avec pour objectif principal l'exploitation des images acquises par le drone d'hélicoptère pour permettre la géolocalisation de défauts. Son élaboration offre une maîtrise de l'ensemble de la chaîne photogrammétrique et permet l'intégration de nouvelles fonctionnalités spécifiques suivant les besoins du drone.

Il a été développé en C++ sous Visual Studio 2005 et utilise les MFC (*Microsoft Foundation Classes*) pour la programmation de l'IHM (Interface Homme Machine). Il s'agit donc d'une programmation « objet » se basant sur plusieurs classes de travail. Concernant les fonctionnalités du logiciel développées par B. Cannelle, elles se décomposent en quatre parties, qu'on retrouve dans l'interface principale sous la forme de quatre onglets (cf. figure 9).

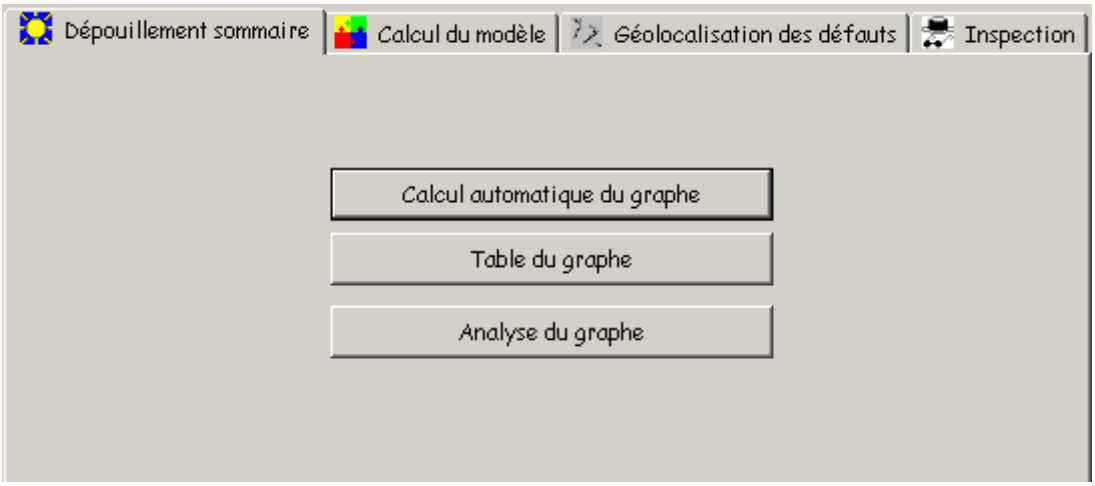


Figure 9: Onglets du logiciel Interface

1- Dépouillement sommaire

Cette partie consiste, après chargement des images et des données de navigation, à calculer le graphe d'images du chantier et à vérifier que le graphe est connexe, c'est-à-dire que chaque image possède au moins un voisin, pour pouvoir poursuivre les calculs.

2- Calcul du modèle

Cette phase consiste à préparer toutes les données qui seront utiles au calcul de compensation. On réalise donc :

- la détection automatique des points de liaison grâce au détecteur SIFT (*Scale Invariant Feature System*) proposé par Lowe [2004], avec une élimination des points aberrants et éventuellement une réduction du nombre de points ;

- le marquage des points d'appui sur chaque image ;

- l'export des fichiers vers le logiciel de compensation *TopAero* développé par l'IGN.

3- Géolocalisation des défauts

Après récupération des valeurs compensées des images et des coordonnées des points de liaison en sortie de *TopAero*, cette étape propose de géolocaliser les défauts de deux manières :

- par monorestitution ;

- par stéréorestitution.

Dans les deux cas, la restitution permet de modéliser le défaut observé à l'aide d'une polyligne ou d'un polygone et de déterminer ses coordonnées-terrain dans le repère de travail choisi (système local ou système WGS84).

4- Inspection

Ce dernier onglet a été conçu dans le but d'une surveillance régulière des ouvrages d'art. Il permet donc d'analyser les coordonnées des désordres d'ouvrages restitués. Une vue 3D permet de mieux repérer la position des éléments restitués.

b) Théorie des graphes

L'utilisation de la photogrammétrie pour la surveillance d'ouvrages est un problème complexe dans le sens où l'objet à restituer est en trois dimensions et que les contraintes sur les clichés et la configuration du chantier sont parfois importantes. Pour cela, la théorie des graphes de Gondran [1995] peut apporter un outil utile dans la détermination des relations de voisinage entre images.

Dans le cas de la photogrammétrie, on peut parler de graphe d'images (cf. figure 10). Celui-ci est constitué de l'ensemble des images $I=\{i_1, i_2, \ldots i_n\}$ où n est le nombre d'images, et d'une famille de relations $C=\{c_1, c_2, \ldots c_m\}$ où m est le nombre de relations de voisinage. Dans notre cas, 2 images sont en relation si et seulement si elles présentent un recouvrement.

Les éléments de I sont appelés les **sommets** et les éléments de C sont appelés les **arêtes**.

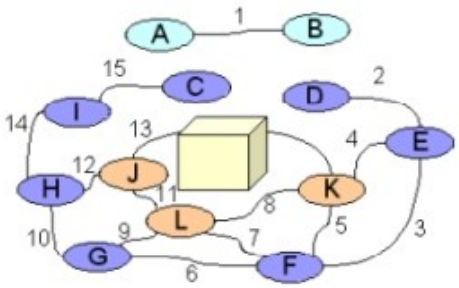


Figure 10: Graphe d'image

Dans l'analyse du graphe, on regarde notamment son nombre de composantes connexes qui traduit le nombre de chaînes qui relient un ensemble de sommets du graphe. On veillera donc à ce que ce nombre soit égal à 1 pour garantir que toutes les images du chantier sont bien reliées entre elles, c'est-à-dire qu'elles possèdent une zone de recouvrement, et qu'il n'existe pas de trous au sein du bloc photogrammétrique.

La détermination de la relation de voisinage est basée sur le calcul d'un « volume image » (cf. figure 11) qui consiste à fixer une distance minimale et maximale d_{min} et d_{max} entre le drone (centre de

prise de vue S) et l'ouvrage (ABCD) et de regarder, pour un couple d'images donné ayant une position et une orientation connue, si leur volume image s'intersecte.

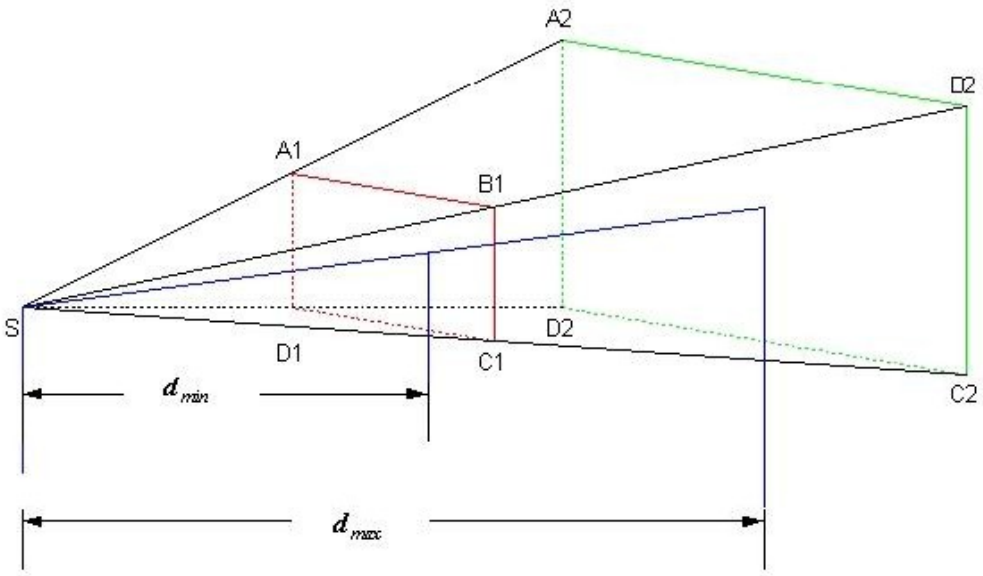


Figure 11: Volume image

Pour valider la relation de voisinage de deux images, on vérifiera notamment la réalisation de 3 hypothèses :

- un des points du volume image de l'une des images se trouve à l'intérieur du volume de l'autre ou une des arêtes d'un volume image de l'une est sécante à une des faces du volume de l'autre.

- l'angle défini par les deux axes de prises de vues est inférieur à $\pi/2$.

- la distance entre deux sommets de prises de vues est inférieure à une limite donnée afin d'éviter les configurations non propices à la mesure stéréoscopique.

c) Détection de points de liaison

La détermination de points de liaison dans un projet de photogrammétrie est une des étapes essentielles. Elle permet de lier les clichés du bloc photogrammétrique entre eux et de réaliser ainsi la compensation par faisceaux qui fournira les coordonnées finales ainsi que leurs précisions.

Cependant, le nombre d'images d'un chantier peut rapidement s'élever à plusieurs dizaines et dans le cas d'ouvrages d'art, la texture observée est souvent homogène (béton, enduit sableux, pierres...) ce qui rend la manipulation délicate et fastidieuse. Ceci nous pousse donc à rechercher un détecteur automatique qui soit suffisamment fiable et robuste pour identifier des points homologues dans le cas de textures homogènes ou de changements d'échelle et d'orientation importants.

Un des détecteurs qui a semblé être le mieux adapté fut celui proposé par Lowe [2004], soit le détecteur SIFT, qui se base sur une pyramide d'images et un calcul d'extremum à travers les échelles. En pratique, le détecteur SIFT recherche tout d'abord les points d'intérêt dans une photographie (cf. figure 12) en utilisant plusieurs transformations faisant varier l'échelle, les rotations et plusieurs autres paramètres. Celui-ci associe ensuite une composante échelle et une composante orientation à chacun des points d'intérêt identifiés et, à partir du voisinage du point, calcule un ensemble de critères. Il réalise enfin des comparaisons avec tous les points de la deuxième photographie et tente ainsi d'apparier le point traité avec son point homologue.

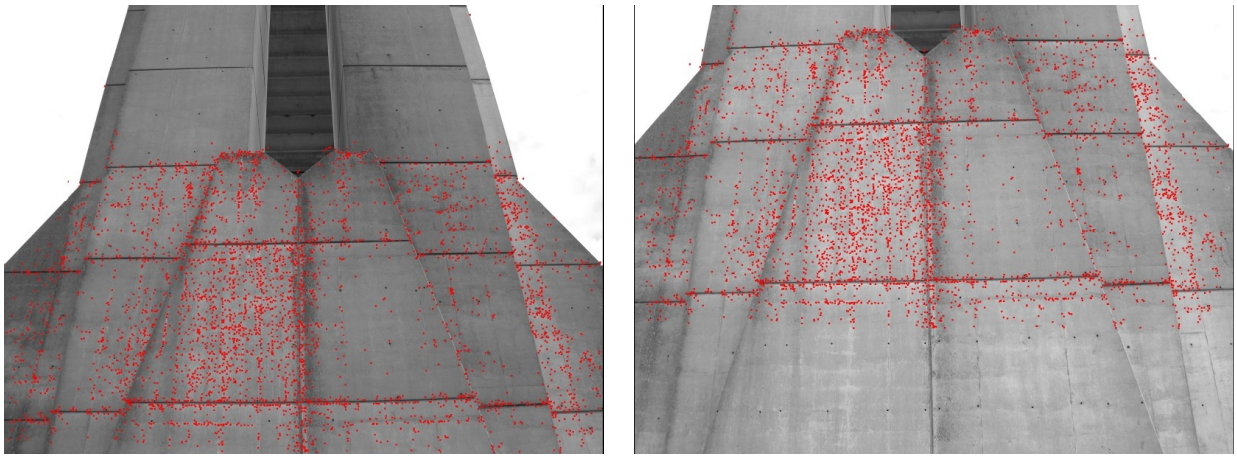


Figure 12: Points d'intérêt détectés par SIFT

Plusieurs tests ont été réalisés à partir d'un jeu de photos présentant une surface relativement homogène (pile de pont en béton) et les résultats ont permis de conclure que SIFT était fiable à plus de 80% dans sa mise en correspondance des points d'intérêt pour créer les points de liaison, ce qui semble acceptable pour son application. Pour augmenter toutefois ces performances, il a été constaté que parmi les erreurs d'appariement commises par SIFT, une grande partie étaient des erreurs grossières ce qui a permis de proposer une solution à l'aide du volume image défini précédemment pour exclure les points extérieurs à ce dernier (cf. figure 13).

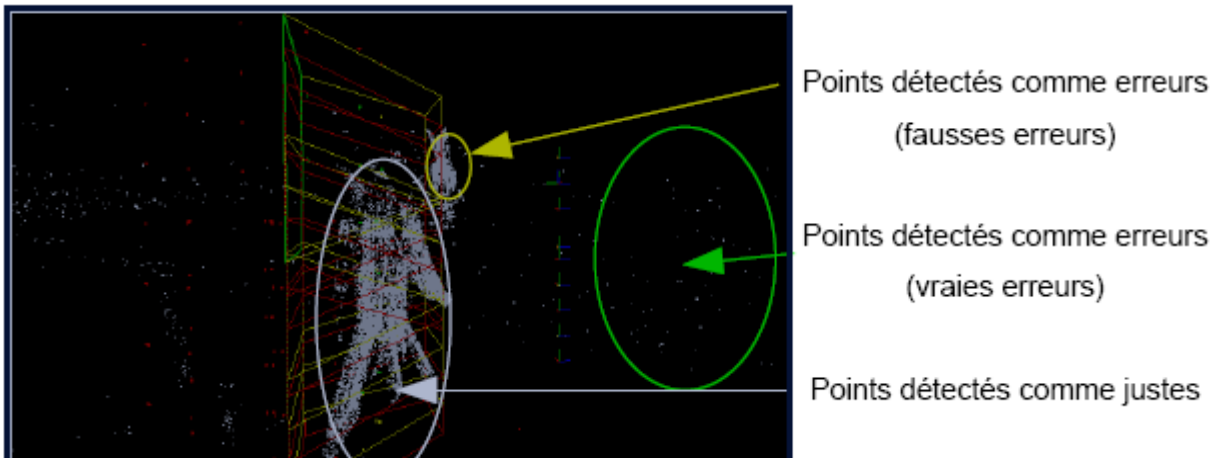


Figure 13: Détection d'erreurs d'appariement dans les points de liaison

On remarquera que pour utiliser ce critère, il est indispensable d'avoir des données de navigation (position et orientation) suffisamment précises et d'avoir correctement ajusté la taille du cône image (d_{min} et d_{max}).

Cette première partie a fait le point sur les différents équipements et méthodes déjà en place sur ce projet. Cela permet de servir de point de départ pour poursuivre la présentation du projet de géolocalisation de façon plus approfondie, avec pour commencer, la présentation de la méthode qui a été mise en oeuvre pour la réalisation des chantiers de géolocalisation.

II. Présentation de la méthode mise en œuvre pour un chantier de géolocalisation

Cette partie explique tout d'abord, comment les techniques de la photogrammétrie peuvent être avantageusement utilisées pour traiter le problème de géolocalisation d'objets pour les projets réalisés avec le drone. Dans un second temps, elle propose une méthodologie qui permettra de décrire la nature et l'enchaînement des différentes étapes indispensables à réaliser pour une meilleure efficacité dans l'exécution des chantiers.

II.1. Particularité de la photogrammétrie appliquée au drone

On rappelle brièvement les principes de base de la photogrammétrie ainsi que les différentes étapes permettant la restitution d'un objet en trois dimensions avant de déterminer ensuite, les adaptations à réaliser sur la chaîne photogrammétrique dans le cas d'une acquisition des clichés par le drone.

a) Principes fondamentaux de la photogrammétrie

La photogrammétrie est la technique qui se propose d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un objet quelconque, en utilisant essentiellement des mesures faites sur une ou plusieurs photographies de cet objet.

Malgré son intérêt certain pour étudier les désordres présents sur certains ouvrages d'art, situés notamment dans des zones difficiles d'accès, la photogrammétrie n'a pas toujours été accessible à tous. En effet, le marché de la photogrammétrie numérique ne s'est développé que récemment grâce à une puissance des ordinateurs qui n'a cessé de croître et qui permet maintenant d'utiliser des logiciels pouvant fonctionner sur un simple ordinateur de bureau.

A partir d'un certain jeu de données de départ, composé d'images en conditions stéréoscopiques et d'un nombre minimum de points d'appui, il est possible de réaliser la chaîne photogrammétrique permettant d'obtenir le modèle en trois dimensions de l'objet photographié et dont on rappelle les principales étapes sur la figure 14 :

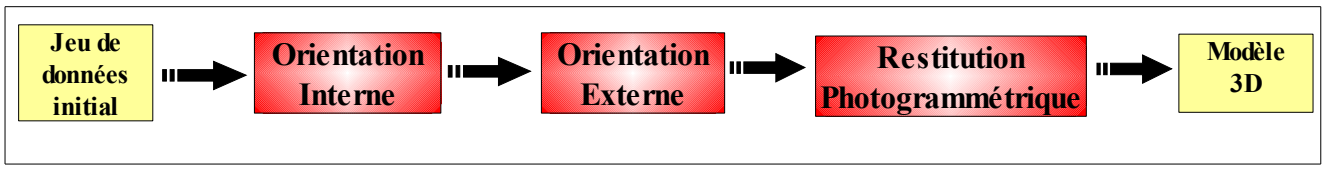


Figure 14: Chaîne photogrammétrique

L'**orientation interne** est la première étape du processus. Elle permet de passer des coordonnées-pixel aux coordonnées-photo grâce à la détermination des paramètres intrinsèques du système de prise de vues tels que la focale, la position du point principal ou encore, les distorsions radiales et tangentielles des images, qui sont obtenus par le biais d'une calibration.

L'**orientation externe** est la seconde étape du processus et peut se décomposer en sous-étapes selon que l'on choisisse une orientation externe en deux étapes (orientation relative + orientation absolue) ou en une étape grâce à la méthode de compensation par faisceaux. Elle a pour but de déterminer les paramètres extrinsèques de l'image (position et orientation du cliché) à partir de la mesure des coordonnées-image de certains points identifiés sur deux photographies ou plus, **points de liaison**, et de la connaissance des coordonnées de quelques points, **points d'appui**, sur le terrain. Par ce calcul de compensation, on peut également obtenir les coordonnées-terrain des points de liaison.

La **restitution** est l'étape finale du processus. Une fois que les paramètres de l'orientation interne et externe sont déterminés et que le modèle est ainsi orienté, la restitution permet de calculer les coordonnées-terrain de n'importe quel point d'une des images et de créer ainsi une reconstruction 3D d'un objet déterminé. On pourra procéder par monorestitution ou stéréorestitution (cf. §III.2).

b) Photogrammétrie combinée pour le drone

La photogrammétrie se base, comme pour la vision humaine binoculaire, sur le principe de la stéréoscopie qui consiste à observer un objet depuis deux endroits distincts pour en saisir le relief. Selon l'objet que l'on souhaite observer, on réalisera des clichés pris à partir d'un avion (photogrammétrie aérienne) ou à partir de stations terrestres (photogrammétrie terrestre).

On rappelle la différence de ces deux méthodes :

- la **photogrammétrie aérienne** est l'ensemble des techniques et des matériels utilisés pour aboutir à la représentation d'un territoire étendu, à partir de clichés de prises de vues aériennes (figure 15). Elle permet la création des cartes et des plans topographiques dont la précision et l'échelle dépendent directement de la hauteur du vol. On notera que l'avion est généralement équipé d'un GPS et d'une centrale inertielle pour la mesure de sa position et de son attitude au moment de chaque prise de cliché.

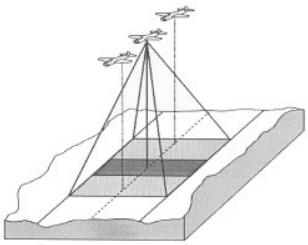


Figure 15: Photogrammétrie aérienne

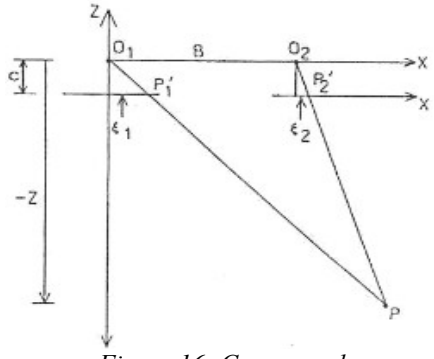


Figure 16: Cas normal

- la **photogrammétrie terrestre ou architecturale** est l'application des méthodes photogrammétriques aux relevés et à la modélisation tridimensionnelle des monuments et des travaux d'architecture à partir de clichés de prises de vues terrestres. Elle se place généralement dans le cas normal, c'est à dire dans le cas où la base B entre les deux clichés de centres O1 et O2 est connue et où les axes optiques sont parallèles (figure 16).

De par ces définitions, on pourra donc qualifier la photogrammétrie utilisée pour le drone d'hélicoptère de **photogrammétrie combinée**. En effet, le fait que le drone ait pour but l'observation d'ouvrages verticaux tels que les ouvrages d'art et que la caméra soit positionnée face à l'ouvrage, cela relève de la photogrammétrie architecturale. En revanche, le fait que la caméra soit embarquée à bord d'un objet volant positionné par GPS et réalisant une acquisition des clichés par bande, cela fait davantage appel aux techniques de la photogrammétrie aérienne.

Afin de combiner ces deux méthodes, plusieurs exigences ont donc été établies pour les chantiers de géolocalisation. On propose, pour garantir une bonne utilisation du drone ainsi que le bon fonctionnement du logiciel de traitement de données, de respecter les contraintes suivantes.

Pour réaliser l'acquisition des images, deux solutions sont envisageables. Une première sous la forme de bandes verticales si l'ouvrage à observer est de type allongé (cf. figure 17) ou une seconde sous la forme de bandes horizontales si l'ouvrage est de type étendu (cf. figure 18). Une acquisition mixte est également possible pour s'adapter au mieux à la morphologie de l'ouvrage.

Figure 17: Bandes verticales

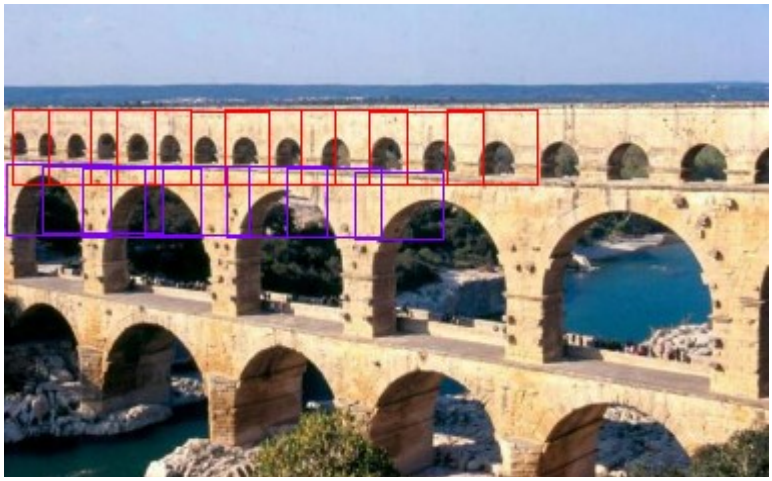


Figure 18: Bandes horizontales

Pour le système de coordonnées des points, il est défini les repères suivants :

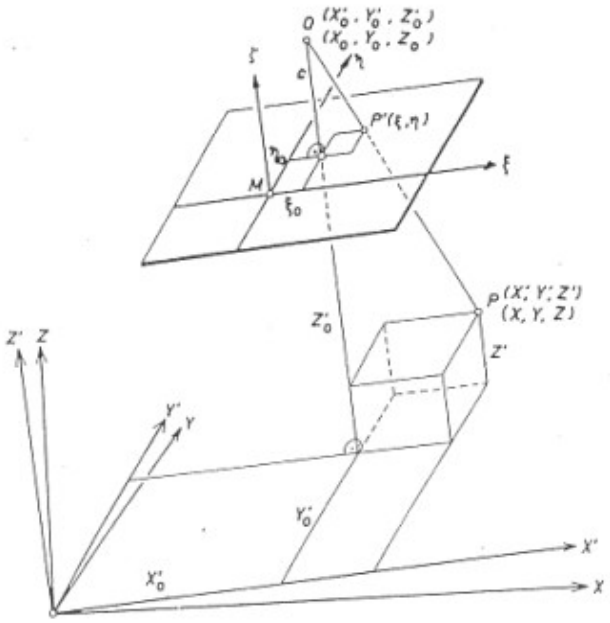


Figure 19: Schéma d'une prise de vue

Repère image défini par :
- (ξ,η) plan de la CCD
- ζ suivant l'axe optique de la caméra

Repère terrain (local) défini par :
- XY dans le plan de l'ouvrage
- Z perpendiculaire au plan XY

Repère intermédiaire défini par :
- (X', Y', Z') parallèle au repère image et centré sur l'origine du repère terrain.

Par la suite, les notations suivantes sont utilisées :

c : distance focale
O : centre de prise de vue de la caméra
P : point terrain observé sur l'ouvrage

On note également R_X, R_Y et R_Z les angles définissant la rotation dans l'espace qui permet de passer de l'orientation du repère image à celle du repère terrain.

Le schéma classique (cf. figure 19) d'une prise de vue utilisée en photogrammétrie aérienne est réutilisée pour le cas du drone. Toutefois, la caméra ayant été pivotée de 90° pour permettre l'observation d'un ouvrage vertical, il est donc nécessaire de réaliser un changement de repère local sur l'ouvrage comme le montre la figure 20. On définira donc, pour le repère terrain, les axes X et Y dans le plan de l'ouvrage et l'axe Z orthogonalement à celui-ci afin de maintenir l'axe Z parallèle à l'axe optique de la caméra.

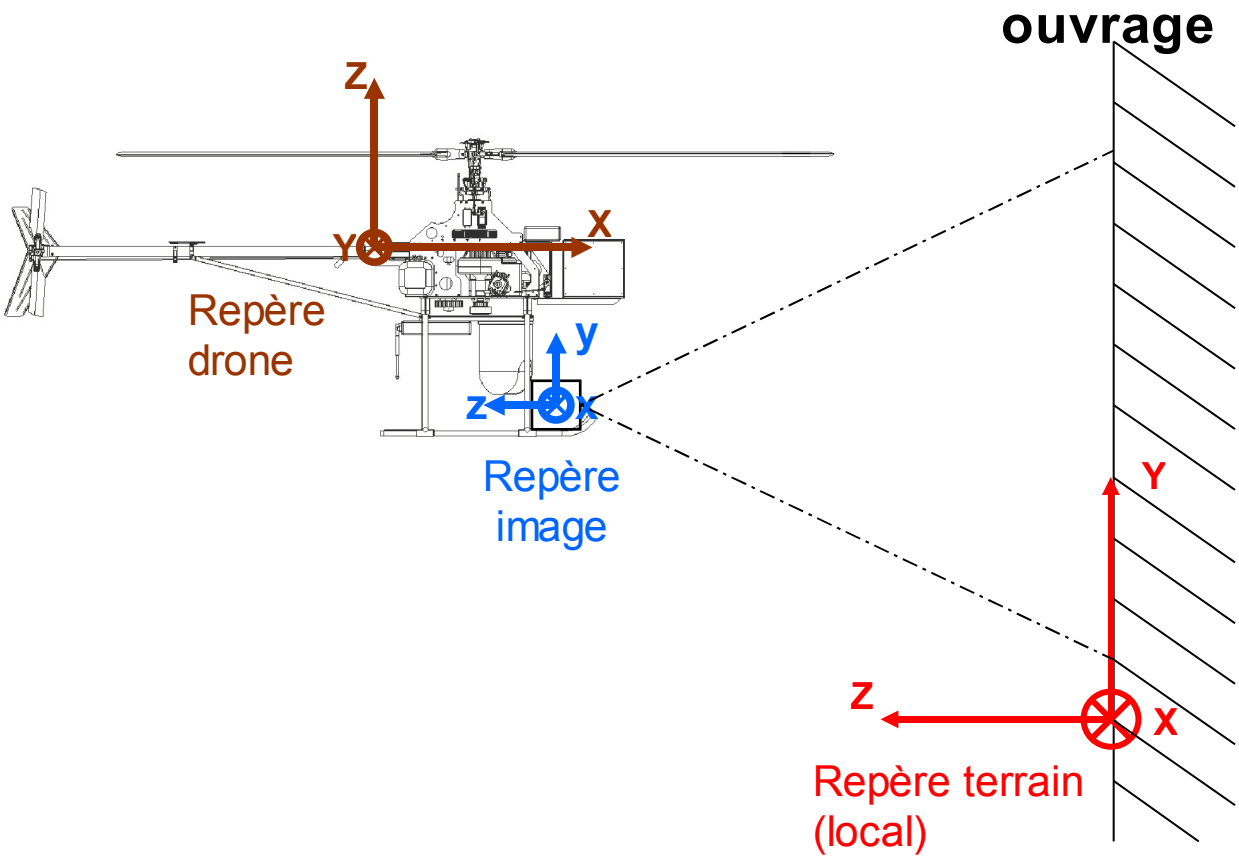


Figure 20: Schéma général des différents repères utilisés

Pour le calcul des coordonnées et des attitudes des centres de prises de vues, on exploitera les informations fournies par l'instrumentation du drone. Les coordonnées des centres de prises de vues sont données directement par le GPS. On a ici négligé la distance séparant le centre optique de la caméra O du centre de gravité du drone G pour lequel sont mesurées les coordonnées GPS. Cela est valable car la précision du GPS du drone est métrique et car la position obtenue ne sert que de valeur approchée pour l'initialisation des calculs de compensation. Une correction de cette distance est toutefois facilement envisageable. Grâce à sa centrale inertielle, le drone mesure également les angles de roulis ω, tangage φ et lacet κ (aussi appelés *Roll*, *Pitch* et *Yaw* en anglais) qui sont respectivement, les angles de rotation autour des axes X, Y et Z du drone (cf. figure 21).

Considérant que la caméra est correctement fixée sur la nacelle du drone, on peut écrire les relations suivantes :

$$(1)\quad \begin{aligned} \overrightarrow{GX} &= -\overrightarrow{Cz} \\ \overrightarrow{GY} &= \overrightarrow{Cx} \\ \overrightarrow{GZ} &= \overrightarrow{Cy} \end{aligned}$$

où (G, X, Y, Z) est le repère du drone
et (C, x, y, z) est le repère de la caméra.

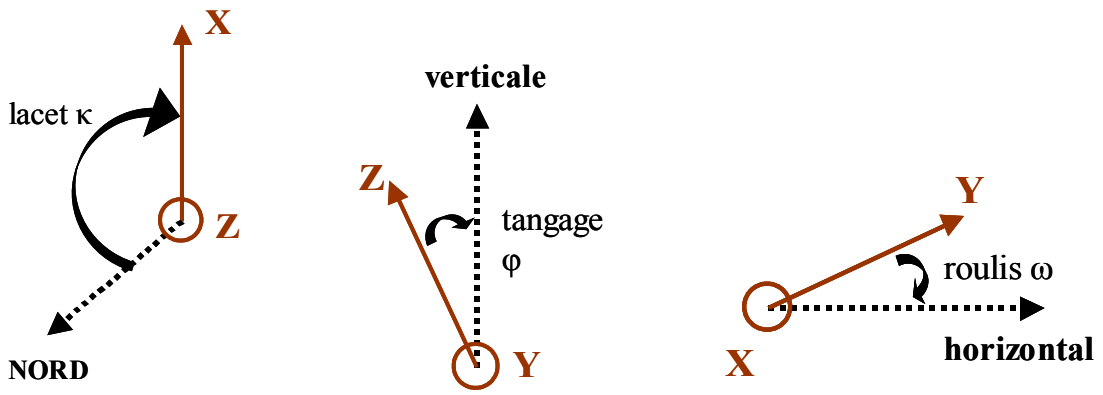


Figure 21: Angles d'Euler mesurés par la centrale inertielle du drone

On détermine enfin les angles permettant le passage du repère image vers le repère terrain par (2) :

$R_X = \varphi$
$R_Y = -(\kappa + \pi - \theta)$
$R_Z = \omega$

où θ = angle entre le Nord et l'axe Z du repère terrain (sens horaire).

Cela permet d'obtenir des angles (R_X, R_Y et R_Z) de faible valeur, ce qui évitera de se trouver dans des cas particuliers pouvant générer des indéterminations (angle proche de 90°). Ces trois angles permettent ainsi d'utiliser la matrice rotation définie pour la photogrammétrie aérienne qui s'exprime de la façon suivante (3) :

$$R = \begin{pmatrix} \cos R_Z \cos R_Y & -\sin R_Z \cos R_Y & \sin R_Y \\ \sin R_Z \cos R_X + \cos R_Z \sin R_Y \sin R_X & \cos R_Z \cos R_X - \sin R_Z \sin R_Y \sin R_X & -\cos R_Y \sin R_X \\ \sin R_Z \sin R_X - \cos R_Z \sin R_Y \cos R_X & \cos R_Z \sin R_X + \sin R_Z \sin R_Y \cos R_X & \cos R_Y \cos R_X \end{pmatrix}$$

La matrice de rotation R définit l'orientation de la caméra du drone par rapport au repère local. Elle est issue de l'application des trois rotations successives, la première rotation se faisant autour de l'axe X, la seconde autour de l'axe Y et la dernière autour de l'axe Z.

II.2. Méthodologie pour un chantier de géolocalisation

Ce second point explicite l'intérêt qui a été perçu par le LCPC pour l'élaboration d'une méthodologie qui ait à la fois, un caractère général pour être applicable aux chantiers divers et variés du drone mais également, un niveau de détail suffisant pour permettre aux intervenants un appui réel tout au long du chantier.

a) Objectifs

La réalisation d'un chantier de géolocalisation appliqué à un ouvrage d'art fait intervenir plusieurs compétences distinctes qui nécessitent d'être correctement guidées et bien coordonnées entre elles pour être efficaces. En effet, l'utilisation du drone est soumise à certaines règles de sécurité

relatives aux objets volants ainsi qu'aux caractéristiques et limitations propres de ses matériels. Parallèlement à cela, s'ajoute, d'une part, les diverses contraintes d'acquisition des données et de transmission de l'information qui font appel à des compétences d'électronique et, d'autre part, toutes les contraintes photogrammétriques concernant l'acquisition des photos durant le vol ainsi que le levé topographique des points d'appui et finalement, le traitement des données pour réaliser la géolocalisation.

Dans ce contexte où les problèmes d'électronique sont gérés par les personnes de la section « Structures et Instrumentation Intégrée », avec Jean-luc Sorin comme principal intervenant, et où les problèmes de topographie et de géolocalisation sont gérés par la section « Imagerie et géolocalisation » dans laquelle je participe pleinement, la rédaction d'une méthodologie de chantier semblait donc indispensable au LCPC pour réaliser de manière plus efficace les différents chantiers à venir.

Les objectifs de la méthodologie proposée sont donc essentiellement de :

- faciliter la préparation et le déroulement d'un chantier ;

- apporter des méthodes faciles et pratiques pour optimiser l'organisation ;

- limiter les pertes de temps et les retours terrain onéreux ;

- servir de texte de référence et d'appui, notamment lors de l'intégration et de la formation de nouveaux intervenants sur un chantier du drone.

Ces objectifs généraux servent de fil conducteur tout au long de la méthodologie et sont développés sous la forme d'un carnet méthodologique présentant les différentes étapes à suivre depuis la préparation du chantier jusqu'à la finalisation du projet et le rendu au client.

b) Description de la méthodologie

Le document réalisé qui constitue à présent la méthodologie des chantiers de géolocalisation du LCPC peut être illustré par l'enchaînement de ses étapes principales comme décrites ci-dessous.

Partie A : DEFINITION DU PROJET

1. S'informer sur la localisation et le type d'ouvrage à observer
2. Récupérer toute information topographique existante (plan, coordonnées, photos...)
3. Définir le type de désordres à identifier ainsi que la précision et la tolérance exigées

Partie B : PLANIFICATION

4. Déterminer le périmètre d'action et les zones de l'ouvrage à lever
5. Calculer les paramètres du levé photogrammétrique
6. Planifier l'emplacement des points GPS et de la polygonale
7. Définir une nomenclature pour les différents points
8. Prévoir une date d'intervention pour se rendre sur les lieux
9. Évaluer la disponibilité satellitaire et les masques possibles pour le GPS

Partie C : RECONNAISSANCE TERRAIN

10. Se rendre sur le terrain pour évaluer les disponibilités et les contraintes du lieu
11. Réaliser un plan de vol pour le drone
12. Implanter les points pour les stations et mesurer les points GPS

Partie D : PRE-TRAITEMENTS

13. Calculer les coordonnées des points levés
14. Constituer le plan de vol du drone à partir des informations recueillies

Partie E : INTERVENTION TERRAIN

15. Effectuer le vol en respectant le plan de vol établi
16. Faire un pré-traitement des données sur le terrain (dépouillement)
17. Effectuer le levé topographique des points d'appui sur l'ouvrage

Partie F : POST-TRAITEMENTS

18. Calculer les coordonnées définitives des points d'appui
19. Transformer les coordonnées dans le système adéquat
20. Traiter les données sous le logiciel *Interface*
21. Entrer les résultats dans une base de données
22. Rendre le projet au maître d'ouvrage

Toutes ces étapes ont été préparées et partiellement mises en application lors du projet mené dans la vallée d'Aspe, qui est présenté dans l'annexe 4, puis ont été reprises également de façon complète pour l'expérimentation effectuée sur le site de tests qui est décrite en quatrième partie.

Cette partie a permis, au travers de la description des étapes constituant un chantier de géolocalisation et de la connaissance préalable des principes de photogrammétrie, d'acquérir une vision globale du projet et de la problématique en jeu. La partie suivante permet quant à elle, de développer plus en profondeur une étape du chantier, celle concernant le traitement des données sous le logiciel *Interface*.

III. Évolution du logiciel de géolocalisation

Cette partie présente les évolutions que j'ai apportées au logiciel pendant mon stage grâce à la recherche et à la programmation de différentes méthodes de traitement d'images et de photogrammétrie.

III.1. Analyse et traitement d'images pour une reconnaissance automatique de cibles

L'une des étapes essentielles dans le calcul d'aérotriangulation est le marquage des points d'appui. La répartition dans le bloc et la précision du pointé de ces points sur les photographies sont déterminantes dans la précision finale des coordonnées. Cette étape demande ainsi à l'utilisateur de pointer sur chaque photo du chantier tous les points d'appui qui y sont visibles et dont on aura pris le soin de bien identifier lors du levé topographique. Cela demande donc beaucoup de concentration et de patience, spécialement dans le cas d'ouvrages d'art où la texture peut présenter un caractère d'homogénéité très fort et où les points d'appui seront donc difficilement identifiables.

Pour pallier ce problème, une idée simple et déjà pratiquée en photogrammétrie est de placer des cibles correctement réparties sur l'ouvrage permettant ainsi une pré-signalisation. Cette technique a pour avantage de garantir que les points d'appui seront visibles sur les images et qu'ils permettront de réaliser une restitution photogrammétrique de qualité. Il sera montré en quatrième partie que des cibles codées correctement mises en place sur le site de tests ont permis de vérifier l'efficacité de cette technique.

a) Algorithme développé pour la reconnaissance de cibles

Dans un but d'automatisation du processus, il a donc été étudié certaines méthodes de reconnaissance automatique de cibles qui se basent sur un traitement de l'image. La méthode qui a été mise en œuvre pour munir le logiciel de cette nouvelle fonctionnalité se décompose en différentes étapes présentées ci-dessous.

1- Préparation de l'image

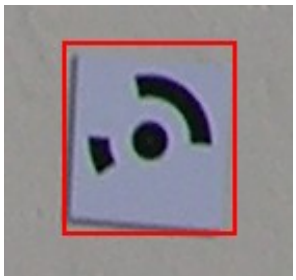


Figure 22: Sélection cible

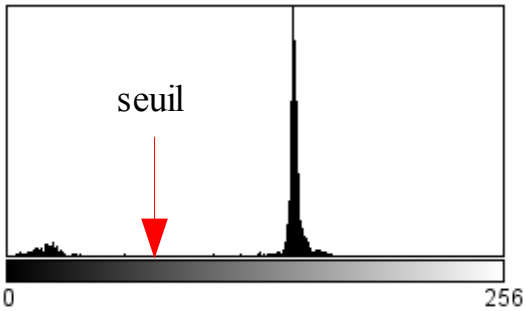


Figure 23: Histogramme de l'imagette

Figure 24: Cible binarisée

On sélectionne tout d'abord une zone comprenant la cible codée (cf. figure 22) et l'on trace son histogramme (cf. figure 23). Par un calcul de dérivées qui comptent le nombre de pics créés par le bruit, cet histogramme est alors lissé jusqu'à l'obtention de deux paquets distincts. D'un côté, on trouve

la population des pixels clairs qui appartiennent au fond et de l'autre, celle des pixels plus sombres qui sont les éléments de la cible. Ceci permet de déterminer une valeur de seuillage et de binariser l'image (cf. figure 24). Les pixels matérialisant les éléments de la cible ont donc une valeur égale à 0 et le fond a une valeur mise à 255.

2- Détection des objets

Une routine permet ensuite d'identifier et de compter les différents objets qui composent la cible et qui serviront à son décodage. Pour cela, on parcourt l'imagette jusqu'à la détection d'un pixel de valeur 0. Par une agglomération de pixels voisins, on parvient alors à reconstituer l'objet et à stocker un certain nombre d'informations comme son nombre de pixels, son rectangle englobant, son barycentre.

3- Calcul des moments de Hu

Les moments de Hu, présentés par Lau et al [2002], sont un outil pratique pour la description de forme dans la reconnaissance d'objets. Ils se caractérisent par un jeu de sept moments invariants, indépendants de toute translation, rotation ou échelle. On donnera ci-après seulement la définition des moments de second ordre qui nous permettront de calculer les paramètres de l'ellipse s'ajustant au mieux à notre objet.

Le moment bi-dimensionnel d'ordre (p+q) d'une fonction de distribution de densité continue f(x,y) est définie par les intégrales de Riemann données dans l'équation (1) :

(1) $m_{pq} = \int\int x^p y^q f(x,y)\,dx\,dy$ où p = 0, 1, 2... et q = 0, 1, 2..

Dans notre cas où la fonction de densité est appliquée à une image pixellisée, f(x,y)=1.

Un calcul de moments démontre que :

- le centre de l'ellipse est donné par (2) $x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}$ *et* $y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}}$
- les demi-axes de l'ellipse sont obtenus par les formules 3 et 4 :

  (3) $a_f = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/4} \left(\frac{m_{20}^3}{m_{02}}\right)^{1/8}$ et (4) $b_f = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/4} \left(\frac{m_{02}^3}{m_{20}}\right)^{1/8}$
- l'orientation de l'ellipse est donnée par l'angle θ défini par (5) $\tan(\theta) = \frac{2m_{11}}{(m_{20} - m_{02})}$

Ces calculs de moments sont donc un moyen de mesurer l'étendue de l'objet relativement à son aire ainsi que son degré d'élongation ce qui renseigne sur la forme globale de l'objet.

4- Test du rond central

La première étape dans la reconnaissance de la cible est de détecter son centre qui est représenté par un rond noir. Pour cela on se base sur le fait que le rond central sera l'objet pour lequel l'ellipse s'ajustera le mieux, c'est à dire l'objet pour lequel la différence entre l'aire calculée lors de la détection de l'objet (nombre de pixels) et l'aire calculée à partir des paramètres de l'ellipse sera minimale.

5- Identification du codage

Une fois que le centre (xc, yc) de la cible est détecté et sachant que la cible a un codage en 10 bits, on découpe l'image en 10 zones (cf. figure 25) qui sont associées chacune à un angle particulier φ = (0°, 36°, 72°, 108°, 144°, 180°, 216°, 252°, 288° et 324°). L'origine pour le décodage est prise sur la verticale supérieure et en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre.

Connaissant également le rayon R du cercle (moyenne du grand-axe et du petit-axe de l'ellipse), on récupère la valeur des pixels suivants :

$$(6)\quad \begin{aligned} x &= x_c + 2{,}75\,R \times \sin(\varphi) \\ y &= y_c + 2{,}75\,R \times \cos(\varphi) \end{aligned}$$

On stocke les valeurs des pixels pour ces 10 zones et on compare ensuite cette combinaison à une combinaison de référence qui nous révélera alors l'identité de la cible ainsi que ses coordonnées-terrain récupérées dans le fichier de points d'appui. Les coordonnées-image associées au point seront les coordonnées du centre de l'ellipse calculée.

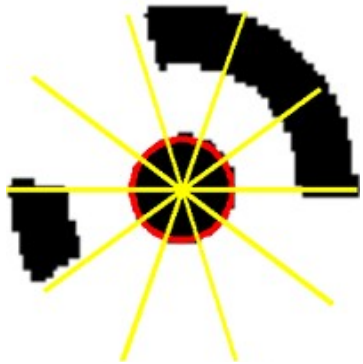


Figure 25: Décodage de la cible

Dans le cas où aucune combinaison n'a pas pu être identifiée, on considère que l'objet sélectionné pour être le rond central est erroné et l'on teste donc l'objet suivant pour lequel la différence d'aire était minimale. Ceci permet de pallier le problème où certains éléments du codage de la cible sont petits et trop proches de la forme du rond.

b) Évaluation de la méthode développée

Dans le but de vérifier l'efficacité de la méthode développée, il a été proposé deux tests. Un premier consiste à comparer les coordonnées-image en pixels de différentes cibles obtenues tout d'abord, de façon automatique grâce à l'algorithme de reconnaissance de cibles réalisé, puis de façon manuelle par pointé des cibles sur l'image.

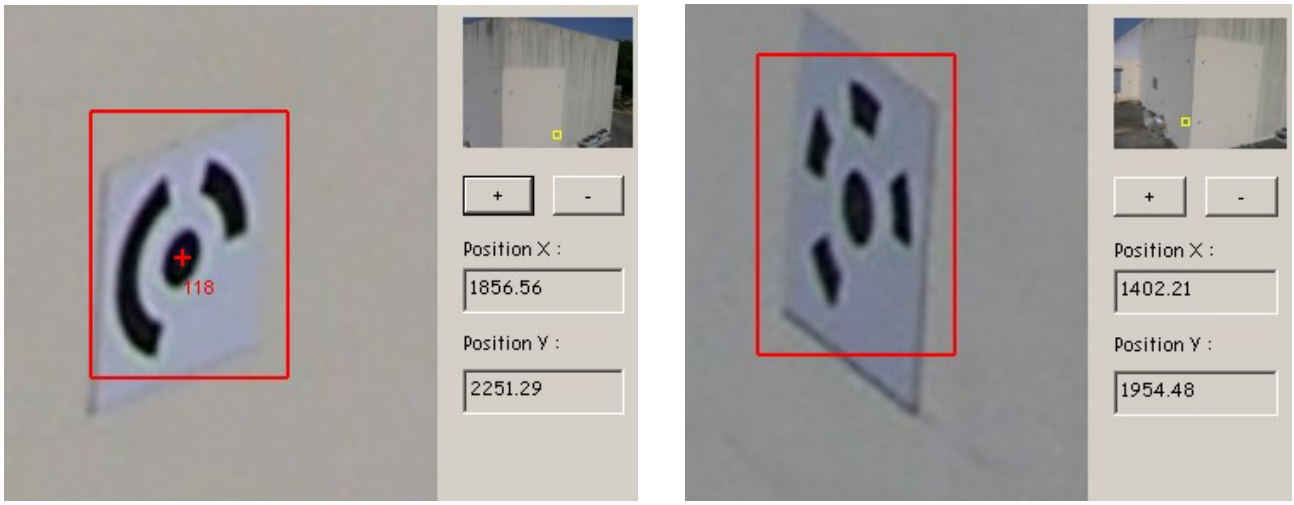
	automatique		**manuelle**			
Cible	**x**	**y**	**x**	**y**	**dx**	**dy**
2	916,67	758,02	915,66	757,90	1,0	0,1
3	2350,55	777,97	2349,65	778,14	0,9	-0,2
4	3006,50	682,03	3005,81	681,99	0,7	0,0
6	845,58	1898,68	844,94	1898,78	0,6	-0,1
7	2314,27	1995,68	2313,52	1995,83	0,7	-0,1
8	3049,21	1181,19	3048,58	1181,35	0,6	-0,2
10	181,13	2327,92	180,17	2327,67	1,0	0,3
11	1569,59	2366,87	1568,90	2367,05	0,7	-0,2
12	3122,02	2406,14	3121,04	2406,44	1,0	-0,3

Tableau 1: Comparaison des mesures automatiques et manuelles des cibles

Tous les écarts observés sont inférieurs à 1 pixel ce qui assure la validité de la méthode par reconnaissance automatique de cibles.

Un second test consiste ensuite à vérifier la robustesse de l'algorithme face à des angles de vues importants. Grâce à une photo prise dans l'angle des deux murs du site de tests, on a observé la capacité de l'algorithme à identifier ou non les différentes cibles présentes sur les murs. Dans un

premier cas, essentiellement les cibles situées sur le mur où l'inclinaison était moins forte, le logiciel est parvenu à détecter la plupart des cibles (figure 26a). Cependant, pour les cibles du mur présentant un angle de prise de vue plus élevé, on a pu remarquer des difficultés pour identifier le codage des cibles (figure 26b). En cas d'échec, le pointé manuel reste donc la seule solution.



a **b**

Figure 26: Reconnaissance automatique de cibles en angle incliné

III.2. Restitution photogrammétrique des désordres d'ouvrages

Ce second point s'intéresse à l'étape de restitution qui va permettre, grâce à la connaissance des paramètres d'orientation externe des différents clichés, de calculer les coordonnées-terrain des points choisis par l'utilisateur, en l'occurrence les désordres observés sur l'ouvrage. Nous exposons, dans un premier temps, différentes méthodes pour réaliser la restitution d'un objet, puis nous explicitons ensuite les améliorations apportées sur le logiciel.

a) Méthodes de restitution

Il existe plusieurs manières de procéder pour restituer un objet en 3 dimensions, elles peuvent toutefois être classées selon deux modes : la stéréorestitution et la monorestitution.

La plus connue est la « **stéréorestitution** ». Cette méthode requiert l'utilisation d'un couple de clichés présentant une zone de recouvrement (stéréomodèle) et possédant leurs paramètres de position et d'orientation compensés. Son principe consiste alors à identifier un point de l'objet qui soit visible sur les deux images et de retrouver ses coordonnées dans le système terrain en calculant la pseudo-intersection des deux faisceaux perspectifs. Le calcul se fait à partir des équations de colinéarité donc seule la qualité de la compensation et la saisie de l'opérateur influence le résultat des mesures.

La seconde méthode est la « **monorestitution** ». Contrairement à la précédente, elle ne requiert qu'une seule image mais impose davantage de contraintes quant à la géométrie de l'ouvrage. Une première méthode avait déjà été mise en œuvre par B. Cannelle dans le logiciel pour la monorestitution, elle est rappelée ci-après. Cependant, cette première méthode présente quelques limites. Il a donc été envisagé de la compléter par une seconde méthode, ce qui permettra à l'utilisateur de choisir le type de monorestitution le mieux adapté en fonction de la configuration du chantier.

La première manière de procéder déjà programmée est d'utiliser le grand nombre de points de liaison qui sont à notre disposition et dont les coordonnées-terrain ont été calculées lors de la compensation en bloc. L'idée est alors de calculer les coordonnées d'un point de l'image grâce à un calcul d'interpolation. Pour chaque point sélectionné, on identifie automatiquement les quatre points de liaison les plus proches et se répartissant dans les quatre quadrants. On réalise alors une triangulation de Delaunay en deux dimensions afin de déterminer le triangle le mieux adapté pour le calcul d'interpolation. Il suffit alors de calculer l'intersection entre le faisceau perspectif passant par le point sélectionné et le plan défini par les trois sommets du triangle.

Cette méthode dépend directement de la quantité et de la répartition des points calculés par le détecteur SIFT. Il s'agit donc d'être vigilant sur les points qui sont utilisés pour le calcul de l'interpolation car il est possible que la triangulation de Delaunay fasse intervenir des points se trouvant sur des plans différents (figure 27a) ou même sur des zones cachées de l'ouvrage (figure 27b) dans le cas où celui-ci ne serait pas quasi-convexe.

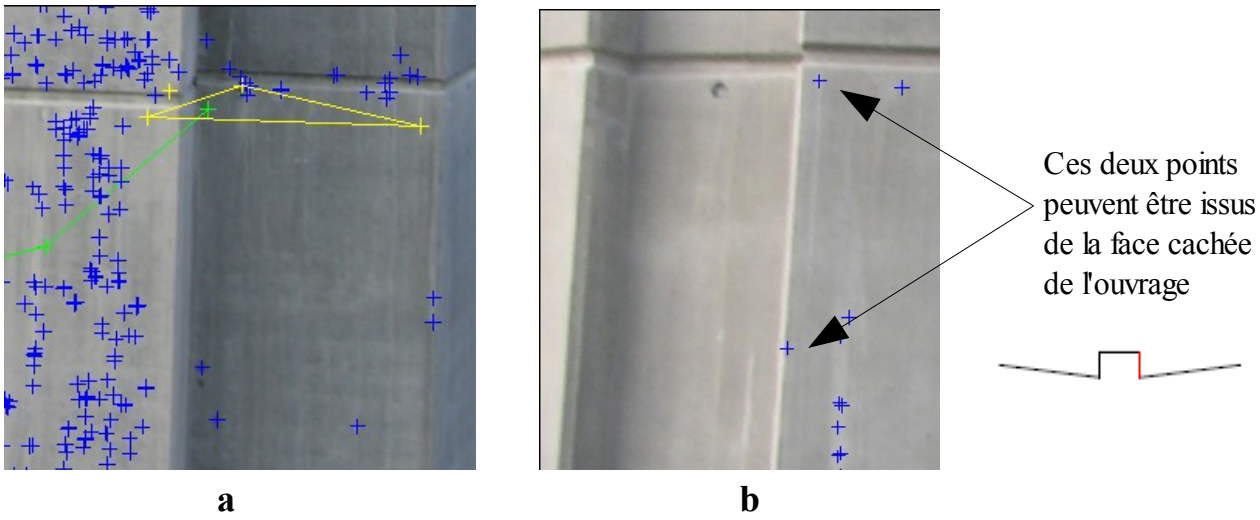


Figure 27: Problèmes liés à l'interpolation

Une seconde manière de procéder a donc été mise en œuvre pour pallier en partie ce problème. Elle consiste à construire une orthophotographie, c'est à dire une image dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. Les trois opérations de rectification à considérer lors du calcul de l'orthophotographie sont donc la correction de l'inclinaison de la prise de vue, la rectification de l'inclinaison des objets due aux pentes (relief) et la correction de l'erreur de parallaxe commise à la visée ainsi que les déformations optiques des objectifs et appareils utilisés. Dans le cas d'une auscultation d'ouvrage d'art, il est généralement possible de décomposer l'ouvrage en plusieurs plans. Dans cette hypothèse d'une surface plane, la création de l'orthophotographie consiste donc simplement à redresser l'image, ou une partie de l'image, à l'aide de quatre points d'appui.

De façon générale, sachant qu'on appelle (e,n) les coordonnées-image et (X,Y) les coordonnées-terrain 2D d'un point, on peut écrire les équations de colinéarité simplifiées par :

$$(7) \quad X = \frac{(a_1 e + a_2 n + a_3)}{(c_1 e + c_2 n + 1)} \quad et \quad Y = \frac{(b_1 e + b_2 n + b_3)}{(c_1 e + c_2 n + 1)}$$

Ces huit coefficients sont alors déterminés à l'aide de quatre points d'appui locaux définissant la

surface plane considérée ce qui permet ensuite de construire la matrice des coefficients, appelée « matrice de perspective » :

$$(8) \quad \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice permet d'appliquer la transformation à des objets (points, polylignes et polygones 2D) que l'on souhaite transférer de la photographie vers le plan réel ou inversement (on utilise alors la matrice inverse).

b) Améliorations apportées

Du point de vue de la programmation du logiciel, le travail a donc consisté à compléter les deux fenêtres de restitution existantes et d'implémenter la méthode de l'orthophotographie pour la monorestitution.

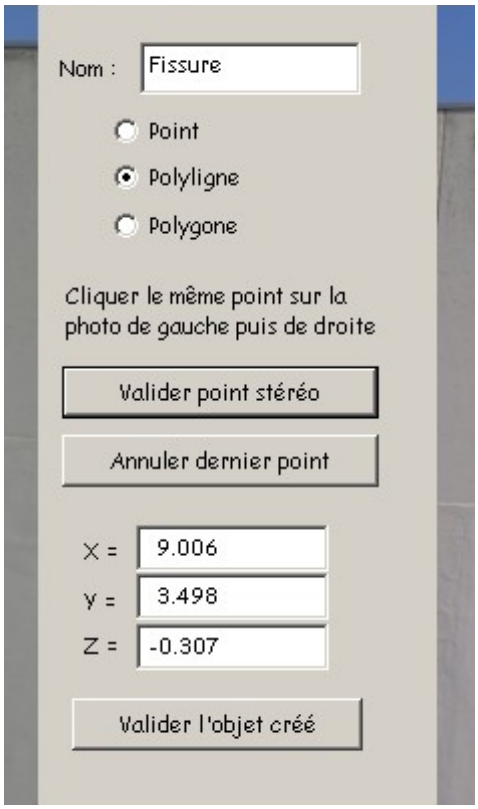


Figure 28: Définition d'un désordre

Concernant les deux fenêtres de monorestitution et de stéréorestitution, il a tout d'abord été mis en place quelques améliorations dans le but d'une meilleure identification et caractérisation des désordres observés sur l'ouvrage.
D'une part, il a été rajouté un champ permettant de donner un nom au désordre restitué. D'autre part, il a été proposé trois types d'objets différents : le point, la polyligne et le polygone, ce qui permet de modéliser la géométrie de tous les désordres qui sont observés.
Ces deux informations permettront une exploitation des résultats plus facile et donc un suivi de l'ouvrage mieux organisé.

Dans la fenêtre de stéréorestitution, afin d'améliorer le contrôle des calculs et de permettre également une première analyse des résultats, il est affiché immédiatement, pour chaque point stéréoscopique validé (pointé sur les deux images), ses coordonnées tridimensionnelles dans le repère terrain (figure 28).

Concernant la fenêtre de monorestitution, elle a été reconfigurée afin d'intégrer la méthode de restitution proposée précédemment (figure 29).

Ainsi, l'algorithme développé prévoit la sélection par l'utilisateur d'une surface plane au moyen du dessin d'un rectangle autour du point à calculer (croix verte). Le logiciel identifie alors les quatre points de liaison, calculés par le détecteur SIFT, se trouvant les plus proches de chaque coin du rectangle (croix violettes). Ces derniers seront utilisés comme points d'appui locaux pour la détermination des huit paramètres inconnus de la matrice de perspective (8). Les coordonnées planimétriques (X,Y) du point sélectionné sont alors déterminées grâce à l'application des équations

(7). La coordonnée Z du point restitué est calculée par moyenne arithmétique des coordonnées Z des quatre points de liaison ayant servi à la détermination du plan.

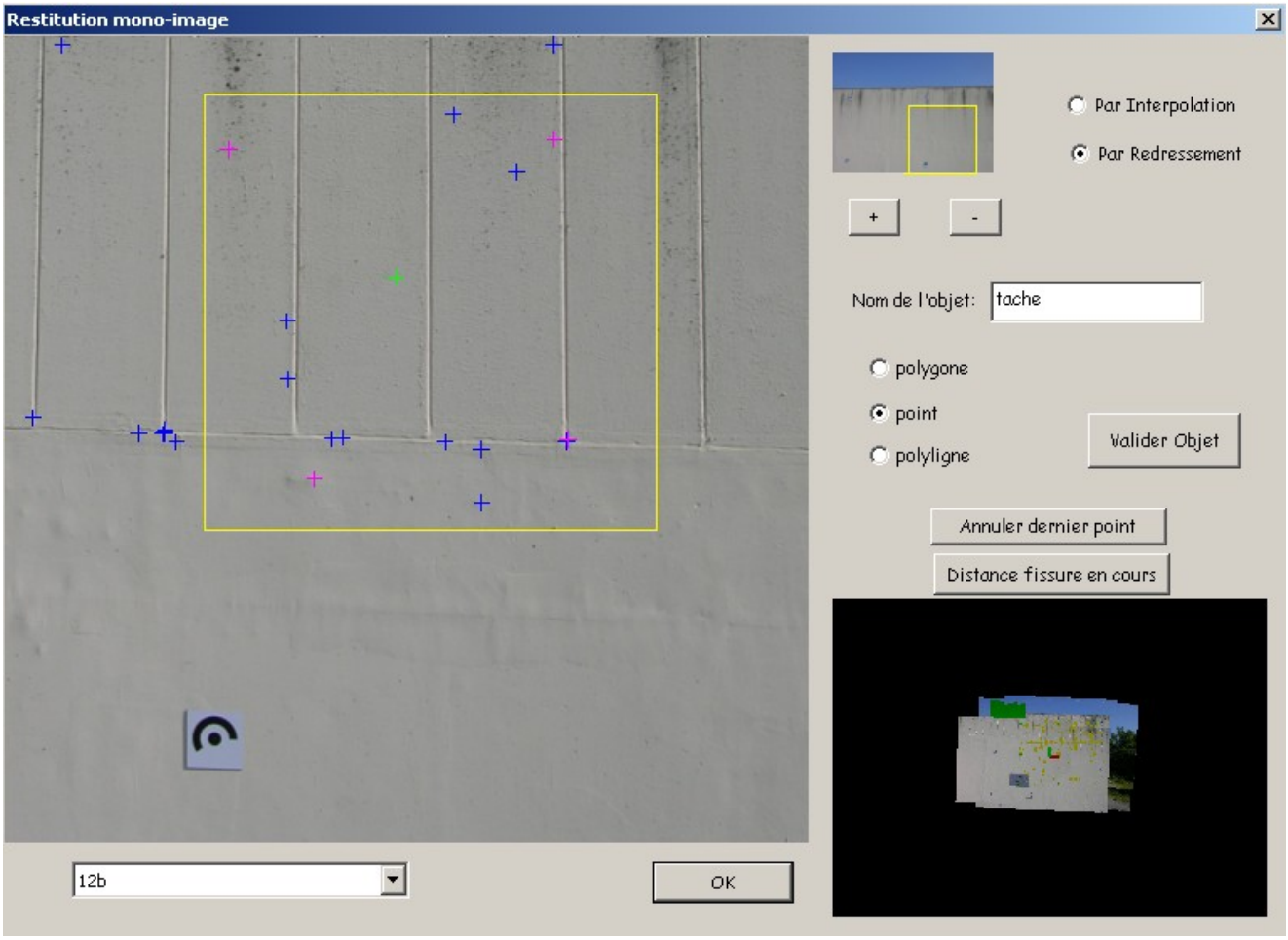


Figure 29: Méthode de redressement d'image pour la monorestitution

On notera que dans les deux cas de restitution, les dessins (point, polyligne et polygone) des objets restitués sont sauvegardés dans des fichiers ASCII (extension .mono et .stereo) dès la fermeture des boîtes de dialogue. Ils contiennent les coordonnées pixels et terrain des points mesurés. De plus, un bouton « Export DXF » permet d'exporter le résultat de la restitution au format .dxf ce qui peut faciliter par la suite, l'interprétation des résultats obtenus par un spécialiste de l'inspection des ouvrages d'art car ce format de fichier est en effet très utilisé dans le milieu des topographes et autres dessinateurs.

III.3. Analyse quantitative des données traitées

Cette dernière partie de développement contribuant à l'amélioration du logiciel s'intéresse plus particulièrement à l'interprétation des résultats offerts par la restitution ainsi qu'à leur gestion. Dans le logiciel *Interface*, cet objectif est prévu dans l'onglet « Inspection » mais ce dernier n'avait pas eu le temps d'être mis en œuvre.

Une réflexion a donc été menée afin d'identifier clairement les données qui permettraient de répondre aux besoins des utilisateurs et de présenter celles-ci sous une forme facilitant l'interprétation

ultérieure. Dans le cadre d'une surveillance régulière d'un ouvrage d'art, l'intérêt est, dans un premier temps, l'observation des désordres présents sur l'ouvrage avec leur géolocalisation dans un système de référence connu (RGF93 ou système local défini) puis, dans un second temps, la confrontation des défauts relevés au cours des années antérieures afin d'établir un bilan de l'évolution des défauts et permettre ainsi la surveillance de l'ouvrage dans le temps.

Pour permettre cette comparaison d'une année sur l'autre, il est possible d'importer deux fichiers : le fichier contenant les désordres restitués dans le chantier en cours et le fichier contenant également les désordres de l'ouvrage réalisé lors de la précédente campagne. Dans le cas où un même défaut est présent dans les deux chantiers, il est reconnu par sa dénomination identique dans les deux fichiers et les coordonnées de l'objet modélisant le défaut (point, polyligne ou polygone) sont alors affichées dans les tableaux respectifs (cf. figure 30) ce qui permet d'observer l'évolution qu'a subi le défaut, aux erreurs de restitution près. Dans le cas où un défaut n'est pas reconnu dans le fichier de référence, cela peut signifier qu'un nouveau désordre est apparu sur l'ouvrage.

Selon que le défaut ait été modélisé par un point, une polyligne ou un polygone, on calcule et affiche certaines caractéristiques telles que:

- nombre de sommets ;
- coordonnées des sommets (XYZ) ;
- distance cumulée (Dcum) ;
- surface 2D.

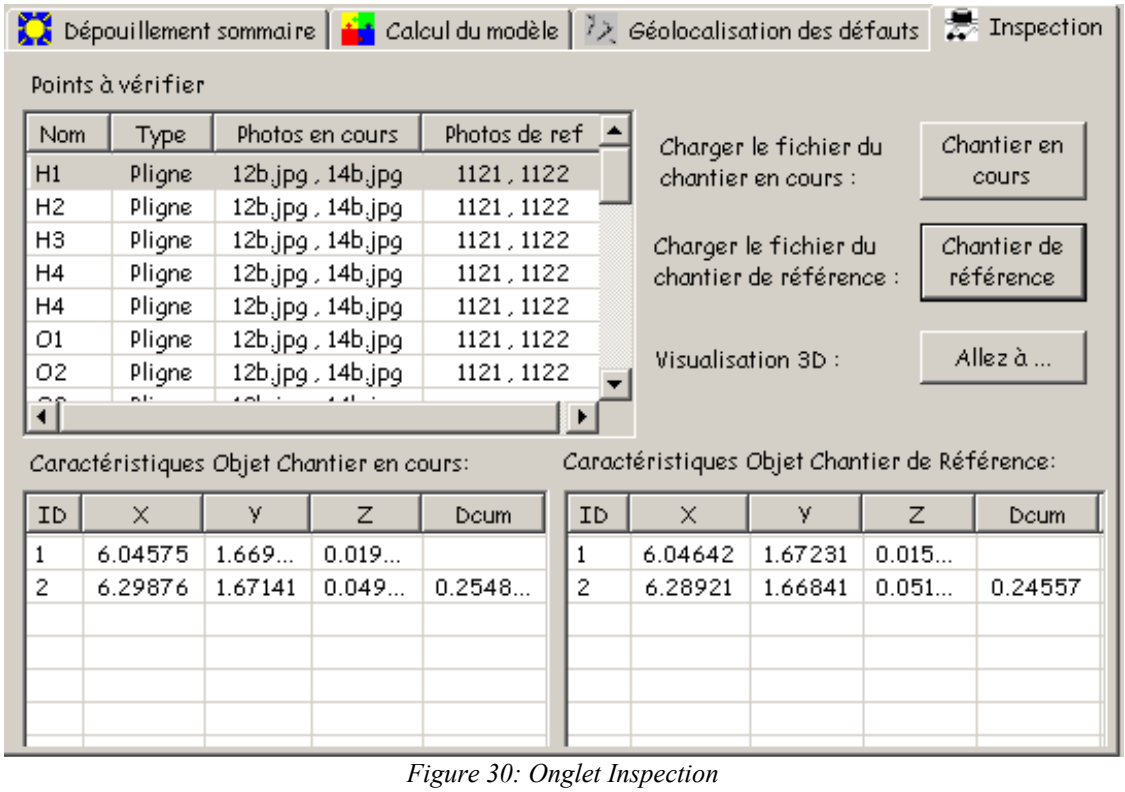


Figure 30: Onglet Inspection

Ces caractéristiques permettent ainsi de faciliter l'interprétation car l'observation seule des valeurs des coordonnées n'est pas l'intérêt principal. Dans cette optique, il a d'ailleurs été envisagé d'importer ces données dans une base de données plus élaborée comme cela sera présenté dans les perspectives.

III.4. Algorithme de compensation

Afin de permettre la restitution photogrammétrique des désordres que l'on observe sur les images, il est nécessaire de connaître les paramètres de l'orientation externe, c'est-à-dire les coordonnées des points de liaison mais surtout les valeurs précises des coordonnées des centres de prises de vues pour chaque cliché ainsi que celles des trois angles fixant son orientation.

Dans le processus proposé par le logiciel *Interface*, cette étape de compensation n'avait pas été programmée et était donc réalisée à l'aide du logiciel *TopAero* développé par l'IGN. Malgré l'efficacité prouvée du logiciel *TopAero*, son utilisation présente certains inconvénients. En effet, cela oblige l'utilisateur d'une part, à posséder les deux logiciels ce qui suppose un double apprentissage, puis d'autre part, cela n'offre qu'une maîtrise partielle des résultats fournis par *TopAero* notamment concernant le choix de la pondération utilisée pour les différents groupes de points ainsi que l'interprétation des résidus et des précisions annoncées. On notera également que ce logiciel a été conçu spécifiquement pour les photogrammètres de l'IGN afin d'orienter les photographies aériennes relevées et qu'il est difficile d'utilisation pour des personnes n'ayant pas une grande connaissance dans ce domaine. Pour ces raisons, il apparaît intéressant de développer un algorithme de compensation qui permette le calcul de ces paramètres d'orientation externe directement au sein du logiciel *Interface*.

On trouve dans la littérature trois méthodes principales pour réaliser les calculs d'aérotriangulation. Une première méthode présentée par Hottier [2000] est la **méthode polynomiale**. Il est recensé principalement la méthode de degré 2 qui s'avère très efficace pour les bases courtes (4 à 10 modèles) mais également d'autres méthodes dérivées qui font varier la forme du polynôme afin de modéliser plus précisément le relief selon qu'il soit plus ou moins accidenté. On trouve enfin des méthodes polynomiales de degré 3 (splines) qui n'imposent pas de longueur maximale pour la bande ou le bloc. Cette première catégorie de méthodes n'est toutefois que peu utilisée. Une seconde catégorie, développée dans l'ouvrage de Kraus [1997], est la **compensation par faisceaux**. Elle consiste à déterminer simultanément les éléments d'orientation externe (position et attitude des prises de vues) d'un couple stéréoscopique (deux clichés présentant un recouvrement d'environ 60%) à l'aide de points d'appui levés sur le terrain ainsi que les coordonnées des points de liaison directement dans le système des coordonnées-terrain. Cette méthode est applicable à un couple de clichés mais s'étend très bien également à un grand nombre de photos. Une dernière catégorie de méthodes est la **compensation en bloc par modèles indépendants**. Cette méthode propose quant à elle un calcul en deux étapes. Un premier calcul d'orientation relative des deux photos en recouvrement, ou de l'ensemble des photos du bloc, permettant de créer le stéréomodèle (modèle 3D du terrain sans échelle). Puis dans un deuxième temps, un calcul de l'orientation absolue utilisant les points de calage et permettant alors de calculer les paramètres de la similitude spatiale pour le passage du système des coordonnées-modèles vers le système des coordonnées-terrain, ce qui force la mise à l'échelle du modèle tridimensionnel.

Bien que la méthode de compensation en bloc par modèles indépendants soit également très répandue et efficace, on préférera utiliser dans notre étude la méthode de compensation par faisceaux parce qu'elle lie directement les coordonnées-images aux coordonnées-objets sans passer par des coordonnées-modèles. C'est également cette méthode qui est utilisée dans le logiciel *TopAero*. Ainsi, la détermination des éléments d'orientation externe des faisceaux perspectifs (droite passant par le centre de projection du cliché et les coordonnées-image du point) est réalisée simultanément pour tous les clichés du bloc grâce à l'utilisation des équations de colinéarité. Une linéarisation des équations et l'utilisation de valeurs approchées avant l'application de la méthode des moindres carrés sont toutefois nécessaires pour le calcul de compensation.

La programmation de cet algorithme a été commencée au sein du logiciel *Interface*. Les étapes de calculs permettant la mise en œuvre de la compensation par les faisceaux est donnée en annexe.

Cependant, par manque de temps et du fait de la complexité du problème, l'algorithme présente de gros problèmes de convergence et n'est donc pas encore opérationnel pour remplacer complètement *TopAero*.

III.5. Documentation utilisateur

Dans le cadre du développement du logiciel *Interface* qui s'effectue sur plusieurs mois et par différents programmeurs, une documentation complète et détaillée est essentielle. Concernant la documentation programmeur, celle-ci se retrouve essentiellement dans le code source, en particulier dans le fichier d'en-tête, sous la forme de commentaires. Ils permettent ainsi d'expliciter les diverses fonctions utilisées ainsi que leurs paramètres. L'architecture du logiciel a de plus, été détaillée dans le rapport de PFE de B. Cannelle [2007].

L'effort a donc porté principalement sur la documentation utilisateur afin que le logiciel puisse être facilement utilisé par les personnes du LCPC. Cette documentation se trouve sous deux formes. La première est numérique, au format .chm qui est le format le plus souvent utilisé pour les aides des logiciels sous Windows et qui permet une navigation aisée pour l'utilisateur. La seconde forme est un manuel papier d'utilisation du logiciel, ce qui est plus visuel et plus facile à manipuler lors de la réalisation des différentes étapes du calcul.

En outre, malgré ces documentations détaillées, une journée de formation a été réalisée pour permettre de reprendre plus facilement le travail effectué, notamment pour Philippe Nicolle.

Cette partie consacrée aux améliorations de diverses fonctionnalités du logiciel a montré en quoi ce travail a permis de faciliter et d'automatiser en partie le traitement des données issues du drone. Le logiciel, tout comme la méthodologie proposée dans la partie précédente, vont à présent pouvoir être testés grâce à un site de tests qui fait l'objet de la partie suivante.

IV. Mise en place d'un site de tests

Cette partie présente le projet de mise en place d'un site de tests afin de répondre aux objectifs de géolocalisation fixés. Elle rappelle les motivations qui nous ont amenées à la création du site de tests, décrit les éléments qui le composent puis fait part enfin, des expérimentations réalisées.

IV.1. Objectifs du site de tests

Grâce à l'étendue du site de Nantes, le LCPC fait, depuis le début, voler le drone sur un emplacement choisi près du bâtiment de la section et présentant plusieurs critères de sécurité pour les manipulations. Toutefois, l'aménagement de ce lieu était très limité d'où l'idée de mettre en place un site de tests dont les objectifs sont présentés ci-après.

a) Maîtrise des vols du drone d'hélicoptère

Malgré une navigation simplifiée du drone d'hélicoptère grâce à sa manette directionnelle et à l'utilisation du mode automatique, la manipulation réelle du drone n'est pas toujours aisée notamment lorsque l'on souhaite le positionner et l'orienter de façon précise. Cela requiert également une très bonne coordination entre les deux personnes dirigeant le drone, ce qui impose un certain entraînement.

La création d'un site de test localisé à proximité et qui possède des conditions d'utilisations optimales est donc appréciable lorsque le responsable souhaite s'entraîner avant le déplacement sur un chantier, veut réaliser des essais particuliers ou former une nouvelle personne à la navigation du drone. Ce site est également l'occasion de mettre en oeuvre la méthodologie proposée afin de valider sa pertinence et sa facilité d'utilisation.

b) Étude de précision

Outre l'aspect technique de manipulation sur le terrain, un des objectifs principaux qui a motivé la mise en place du site de test est de pouvoir quantifier le niveau de détail que l'on peut extraire à partir des images fournies par le drone ainsi que de pouvoir évaluer la précision maximale que l'on peut atteindre avec cette méthode de géolocalisation par photogrammétrie. L'objectif est également de réaliser une étude de la qualité des images issues de l'appareil photo du drone et d'évaluer le besoin éventuel d'un travail de déflouage. La qualité des images est en effet déterminante dans la précision finale des coordonnées et doit être correctement prise en considération.

c) Calibration de nouveaux matériels

Un dernier objectif de la création d'un site de tests est de disposer d'un site créé artificiellement, donc entièrement connu, ce qui lui confère le rôle d'un site de calibration, c'est-à-dire qu'il peut ainsi servir de référence et de base d'étalonnage dans le cas où l'on effectuerait un changement ou un ajout de matériel sur le drone. Il permettra ainsi de vérifier si un nouveau matériel est plus performant et améliore significativement la qualité des résultats de géolocalisation.

IV.2. Mise en place

Afin de concrétiser le projet, une réflexion a été faite pour valider, d'une part, le choix du lieu pour le site de tests et pour décider, d'autre part, des aménagements à réaliser sur ce site au niveau des désordres à représenter puis au niveau des repères topographiques à installer.

a) Choix du lieu

Pour le choix du site, plusieurs critères ont été pris en compte. Tout d'abord un critère de proximité avec l'atelier où est stocké le drone afin de faciliter les déplacements et la manutention de celui-ci. Un autre critère était celui de l'espace pour pouvoir intervenir sur une zone dégagée et avec peu de circulation (voitures et piétons) pour respecter de bonnes conditions de sécurité. Enfin un critère de similarité avec un ouvrage d'art au niveau de ses dimensions et de ses caractéristiques de surface (matériau, présence de désordres...) a aussi été considéré.

Figure 31: Lieu du site de tests

Il en ressort que le mur extérieur de l'atelier du LCPC, illustré sur la figure 31, remplit correctement ces critères et peut donc faire l'objet de l'installation du nouveau site de tests.

Considérant la règle de sécurité fixée pour le drone de ne pas voler à moins de 10 mètres de l'ouvrage, et considérant aussi la présence de 2 poteaux en béton du côté Est, on concentrera davantage les équipements du site de tests sur le mur orienté Sud qui présente un espace mieux dégagé pour l'approche et la navigation du drone.

On pourra toutefois exploiter la géométrie du bâtiment avec l'angle présent entre les deux murs ce qui pourrait être intéressant pour les tests, sans néanmoins s'approcher trop près du premier poteau. De plus, la présence d'un champ à proximité du mur côté Sud permettra les décollages et atterrissages du drone dans de bonnes conditions.

b) Installations

Deux installations majeures ont été mises en place sur le site de tests. Il s'agit, d'une part, d'un ensemble de cibles codées et, d'autre part, d'un panneau de tests permettant de modéliser un certain nombre de désordres des ouvrages d'art.

1- Cibles

Comme cela a été présenté dans la partie III.1, l'utilisation de cibles pour matérialiser les points d'appui sur l'ouvrage apporte de nombreux avantages. Les cibles permettront notamment d'éviter le pointé des points d'appui sur les images avec le risque principal de commettre des erreurs grossières ou des imprécisions et elles faciliteront les calculs. Il a donc été proposé d'utiliser des cibles semblables à celles utilisées dans les logiciels de calibration de caméra ou de photogrammétrie. On a, de plus, opté pour un codage 10 bits pour disposer d'un nombre suffisant de configurations de cibles.

On propose enfin de les répartir de façon homogène sur les murs Sud et Est comme l'illustrent les figures 32 et 33.

Figure 32: Répartition des points d'appui et plaque de tests sur le mur Sud

Pour améliorer la précision des coordonnées finales issues des calculs de compensation, il est important d'avoir des points d'appuis positionnés sur les bords de l'objet considéré. Ceci permet de fixer davantage le modèle photogrammétrique au terrain réel et évite ainsi de trop gros calculs d'extrapolation qui sont sources d'erreurs dans les coordonnées des points.

Figure 33: Répartition des points d'appui sur le mur Est

Dans le positionnement des cibles, il faut également prendre en compte les difficultés de vol du drone notamment pour les points les plus bas et les plus à gauche car le drone ne peut pas s'approcher trop près du sol ni même d'un mur en raison de l'imprécision des instruments qui l'équipent (GPS, altimètre, centrale inertielle...) et des aléas climatiques (chute de pression, rafale de vent...).

Sur le mur Est, on ne placera que six cibles car les poteaux en bétons peuvent gêner le déplacement du drone. Ces cibles permettront juste de pouvoir prendre des photos dans l'angle et en amorce du mur ce qui donnera du volume à notre modèle et le rendra plus intéressant pour les tests.

Cette répartition donne un total de 18 cibles ce qui permettra que plusieurs points d'appuis soient visibles sur chaque photo prise par le drone et cette couverture homogène permettra également d'apporter une bonne configuration pour les calculs et la précision des résultats.

Chaque cible a de plus, été imprimée sur un support en dibon, résistant aux conditions extérieures, de 3mm d'épaisseur et de 25 cm de côté. Ces dimensions ont été calculées de sorte que pour l'acquisition de clichés depuis le drone, c'est à dire à une distance minimale de dix mètres, la résolution de l'image permette la représentation des cibles avec un nombre suffisant de pixels, critère indispensable pour les calculs de reconnaissance automatique.

2- Panneau de tests

Dans le but d'approfondir les études de qualité d'images et de niveau de détails visibles sur les images, il a été conçu un panneau de tests mobile (figure 34) représentant plusieurs formes géométriques dont le but est la modélisation des diverses fissures avec tailles et orientations variées et des autres désordres caractéristiques des ouvrages d'art. Le choix des traits suivant plusieurs orientations est pour permettre d'étudier l'ampleur des vibrations que génèrent le drone.

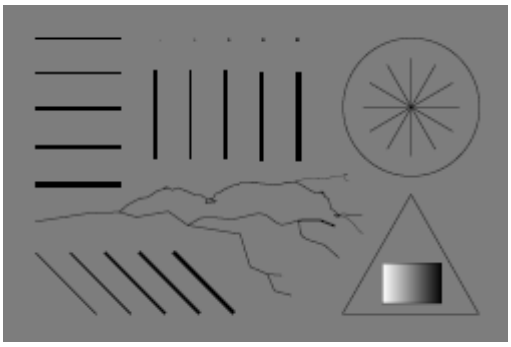


Figure 34: Plaque de tests avec des désordres représentatifs

On trouve sur ce panneau :

- des traits horizontaux, verticaux, et obliques de taille : 1mm; 3mm; 6mm; 8mm; 10mm ;
- des points de diamètre croissant ;
- des formes géométriques de base : cercle, étoile, triangle, rectangle ;
- une fissure composée d'éléments segments, courbes et dessin main levée.

On remarquera que du fait de l'orientation plein Sud du mur et de son revêtement clair, lors des jours de soleil, la paroi est très réfléchissante et peut détériorer la qualité des prises de vue. On a donc envisagé un gris moyen (couleur 127: la moyenne du blanc et du noir) pour la couleur de fond de manière à représenter au mieux la couleur des matériaux majoritaires sur les ouvrages d'art (béton ou pierre). Concernant le dessin des défauts artificiels, on a choisi la couleur noire qui accentue mieux le contraste et facilite les traitements d'images. On notera que pour une distance entre le drone et le mur de 10 m ainsi qu'une résolution maximale de l'appareil Nikon Coolpix (8 mégapixels), un pixel terrain mesure environ 3 mm, d'où le choix des tailles des traits.

L'intérêt de ce panneau test est de permettre, d'une part, de vérifier la concordance avec certains tests effectués précédemment avec le drone (cf. Moliard [2006]) et, d'autre part, de détecter une éventuelle amélioration ou dégradation de la qualité des acquisitions réalisées par l'appareil photo, ceci dépendant très fortement du problème de vibration que connaît la nacelle en vol.

Sur ce site de tests, un certain nombre de désordres naturels sont également déjà présents. On rencontre notamment sur ces murs quelques désordres illustrés dans la figure 35 :

Trou avec apparition de fer | *Fissure verticale* | *Décollement de peinture* | *Fissure en angle* | *Trous ponctuels* | *Tâches et oxydation de surface*

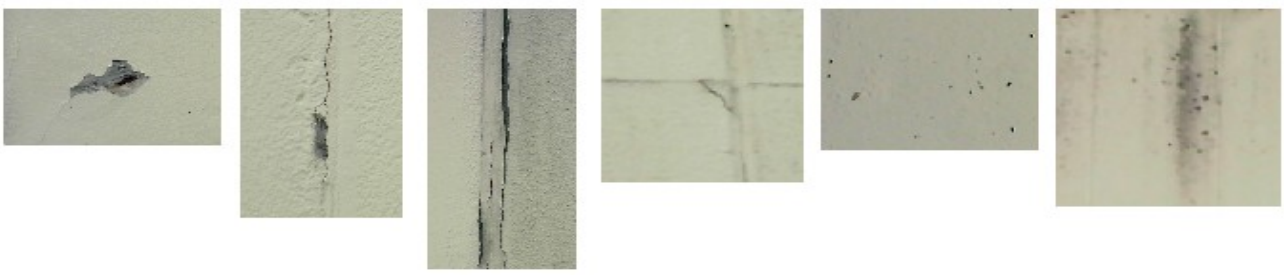


Figure 35: désordres présents sur les murs du site de tests

Ces deux installations principales mises en place sur le site servent d'éléments de base et pourront certainement être complétées par d'autres objets en fonction de l'orientation des projets réalisés pour le drone.

c) Repères topographiques

Le site de tests est muni de trois clous de géomètre qu'on a implanté dans la partie goudronnée au pied des deux murs ainsi que d'un piquet en bois positionné dans le champ situé au sud du site comme l'illustre la figure 36.

Figure 36: Vue aérienne du site de tests

Ces quatre points servent de repères topographiques pour le site de tests. Ils ont donc été relevés, d'une part, à l'aide d'un GPS afin de déterminer leurs coordonnées géographiques dans le repère WGS84 (cf. tableau 2) et, d'autre part, à l'aide d'un tachéomètre afin de déterminer leurs coordonnées cartésiennes dans un repère local (cf. tableau 3).

	longitude	latitude	hauteur
1	1° 38' 13.26614"W	47° 09' 21.47825"N	70.357
2	1° 38' 14.09882"W	47° 09' 21.75886"N	70.921
3	1° 38' 13.32654"W	47° 09' 21.90836"N	70.978
4	1° 38' 13.06484"W	47° 09' 22.66109"N	71.052

Tableau 2: Coordonnées WGS84 des clous

	X	Y	Z
1	16,196	13,702	-2,382
2	-0,373	10,291	-2,330
3	-7,583	-12,492	-2,252
4	-0,660	23,631	-2,948

Tableau 3: Coordonnées locales des clous

Afin de garantir leur pérennité, il a été réalisé une fiche signalétique pour chacun de ces points. Ceci permettra de réimplanter les points dans le cas où certains d'entre eux disparaîtraient.

IV.3. Expérimentations

Afin de valider les méthodes proposées par la méthodologie établie mais également par le logiciel *Interface*, une expérimentation sur le site de tests a été réalisée. Une étude préalable sur les réglages de l'appareil photo du drone est donnée en introduction avant de détailler dans les points suivants, le protocole expérimental mis en œuvre pour l'acquisition des clichés puis le levé topographique des points d'appui.

a) Étude photographique

Au départ de la chaîne photogrammétrique et base essentielle de tous les calculs, les clichés pris par l'appareil photo du drone prennent une importance non négligeable. Ils sont les garants principaux de la qualité et de la précision finale obtenues pour le projet. On voit donc l'intérêt de consacrer une attention particulière à l'étude des réglages qu'offre l'appareil photo afin d'être capable de choisir la configuration la plus adaptée et fournissant les meilleurs résultats dans chaque cas.

Lors des précédents chantiers, l'appareil photo avait été utilisé uniquement en mode automatique ce qui facilite son utilisation et garantit normalement une certaine qualité des clichés car l'appareil calcule lui-même les réglages à réaliser en fonction de la luminosité. Cependant, on a remarqué que le mode automatique utilise, pour des conditions de lumière normales, des vitesses d'obturation relativement faibles (inférieures à 1/200) ce qui, du fait des vibrations générées par le drone en vol, créait souvent du flou sur les images (cf. figure 37).

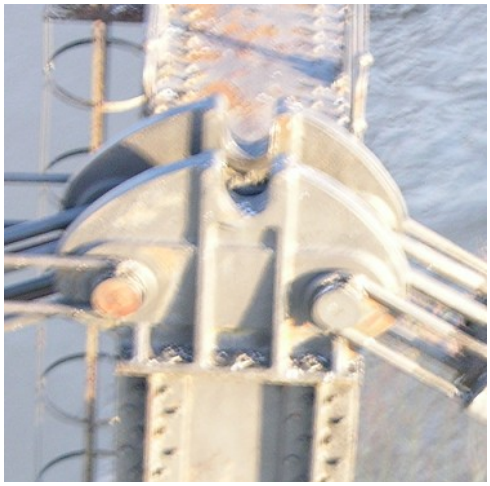


Figure 37: Exemple de flou rencontré sur le pont de Tonnay Charente

L'étude de l'appareil photo Nikon Coolpix 8700 a montré l'existence de plusieurs modes possibles de prise de vue. On comparera pour l'occasion seulement deux modes (auto-programmé et semi-automatique). On notera également que le système électronique du drone ne permet actuellement pas de modifier les paramètres de l'appareil photo lorsque le drone est en vol, d'où l'importance d'avoir correctement choisi le mode à utiliser ainsi que les différents réglages de l'appareil photo avant le décollage afin de garantir des images de bonne qualité et exploitables.

Deux modes sont étudiés pour l'acquisition des photos prises à partir du drone.

Mode	Principe	Réglages réalisés
P «Auto-programmé»	L'appareil photo règle automatiquement la vitesse d'obturation et l'ouverture pour obtenir une exposition optimale.	possibilité de choisir la combinaison vitesse-ouverture proposée par l'appareil.
S «Auto à priorité vitesse»	L'utilisateur choisit la vitesse et l'appareil sélectionne alors l'ouverture qui donnera la meilleure exposition.	vitesse de 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000 et 1/4000.

Plusieurs tests ont été réalisés au sol en choisissant deux zones à photographier, l'une présentant des couleurs sombres et une faible luminosité et l'autre présentant des couleurs plus saturées. En faisant varier les vitesses d'obturation du mode S et en comparant les résultats avec les images obtenues par le mode P, on a pu conclure les remarques suivantes.

En mode auto-programmé (mode P), l'exposition des photos est très satisfaisante mais on observe que l'appareil fait principalement varier la vitesse d'obturation. Ainsi, dans le cas d'une surface obscure, la vitesse atteint des valeurs très faibles ce qui laisse penser que cela pourra entraîner des effets de flou lorsque l'appareil photo sera embarqué sur le drone. Dans le cas de la surface plus claire, la vitesse est légèrement plus grande mais ne semble toutefois pas suffisante également pour

résister aux vibrations du drone concernant les effets de bougé.

En mode semi-automatique (mode S), le risque de sur-exposition ou de sous-exposition est plus grand mais une analyse rapide de la zone à photographier permet d'obtenir des résultats d'exposition très satisfaisants et avec des vitesses d'obturation plus élevées. Ainsi, lorsque la surface est plutôt sombre, une vitesse entre 1/500 et 1/1000 semble convenir et si la surface est plus claire, les vitesses offrant les meilleurs résultats sont entre 1/1000 et 1/2000.

Le choix de la vitesse d'obturation est donc à ajuster en fonction de la luminosité (présence ou non de soleil) mais d'autres paramètres de réglages sont également déterminants dans la qualité de l'image. L'étude plus détaillée concernant tous les paramètres de réglage de l'appareil est donnée en annexe.

b) Réalisation du chantier test

La réalisation du chantier du site de tests a été menée telle que proposée par le carnet méthodologique, afin d'en valider sa pertinence ainsi que sa facilité de mise en oeuvre.

A. Définition du projet

1) Localisation et type d'ouvrage à observer

Le site de tests se trouve à l'arrière de l'atelier Darcy sur le site du LCPC Nantes. L'ouvrage à observer est constitué de deux murs en béton peint à angle droit orientés Sud et Est. L'environnement proche est relativement bien dégagé avec absence de circulation routière ou piétonne et l'accessibilité y est facile.

2) Informations topographiques disponibles

Coordonnées approximatives
WGS84 :

longitude = 01° 38' 14" O
latitude = 47° 09' 23" N
altitude moyenne = 25 m

Dimensions des murs Sud et Est :

longueur Lg = 15 m
hauteur Ht = 10 m

Figure 38: Vue aérienne du site de tests

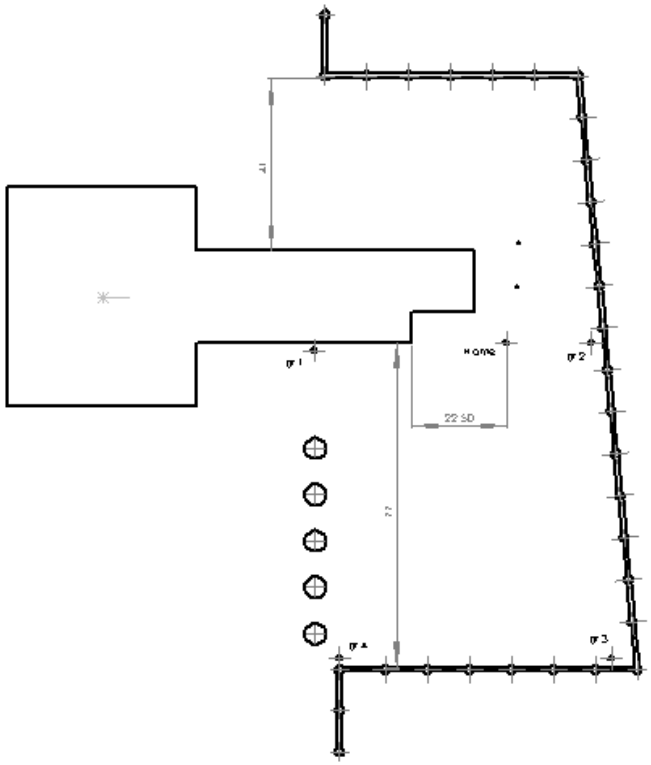


Figure 39: Plan topographique du site de tests élargi

3) Cahier des charges proposé

Dans le cas de l'expérimentation qui est réalisée sur le site de tests, l'objectif est principalement d'observer la précision que l'on pourra atteindre dans le cas de conditions optimales comme celles offertes par ce site.

B. Plannification bureau

4) Périmètre d'action et zones à lever

Les zones à observer et photographier sont le mur Sud dans sa totalité et le mur Est pour sa partie gauche.

5) Paramètres du levé photogrammétrique

Données :

- Recouvrement de 60% en horizontal et de 20% en vertical ;
- Distance drone-ouvrage de 10m ;
- Taille de la CCD de 8,8x6,6mm ;
- Résolution maximale de 3264x2448 pixels ;
- Focale fixe de 8,9mm.

La surface couverte par une photo sera donc de:

L = 0,0088 x 10/0,0089 = 9,9m
H = 0,0066 x 10/0,0089 = 7,4m
La base entre les photos est de:

Base horizontale Bh = 9,9 x (1-60%) = 4,0 m
Base verticale Bv = 7,4 x (1-20%) = 5,9 m

Le nombre approximatif de photos à réaliser pour le recouvrement du mur Sud est de:

- Nombre de photos par bande:

n = entierSup[Lg / Bh + 1]
n = 5 photos.

- Nombre de bandes par bloc:

m = entierSup[Ht / Bv]
m = 2 bandes.

D'où un total qui est de **10 photos.**

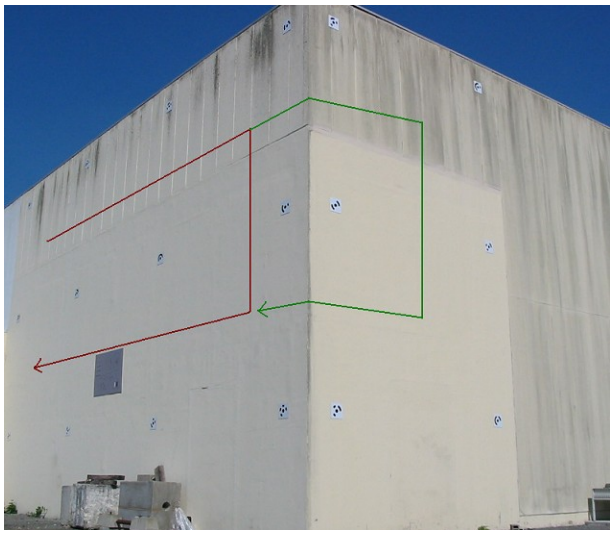


Figure 40: Trajectoires suivies par le drone lors des deux vols

Pour le mur orienté Est, on ne s'intéressera qu'à la partie gauche du mur du fait de la présence de deux pylônes en béton à proximité qui gênent la navigation du drone dans cette zone. Le nombre de photos sera donc limité à un nombre de 4 + 2 présentant un angle de 45° pour la jonction des deux murs. La figure 40 permet d'illustrer la trajectoire suivie par le drone, situé à 10 mètres du mur, pour l'acquisition des clichés des bandes supérieure et inférieure.

6) Points GPS et polygonale

Du fait de l'étendue réduite du site de tests, il n'y a pas lieu de réaliser une véritable polygonale. Seules deux stations pourront être mises en place pour le levé des points d'appui côté Sud puis Est.

7) Nomenclature des points

Les points d'appui matérialisés par les cibles fixées au mur sont numérotés de la façon suivante :

Mur SUD	**Mur EST**
Haut: 101 102 103 104	Haut: 113 114
Milieu: 105 106 107 108	Milieu: 115 116
Bas: 109 110 111 112	Bas: 117 118

Les repères topographiques (clous + piquet) implantés au sol sont numérotés de 1 à 4.

8) Date d'intervention

Compte tenu des disponibilités matérielles et humaines, mais surtout des conditions météorologiques, l'intervention a été programmée pour le mercredi 21 mai 2008.

9) Disponibilité satellitaire

A l'aide du logiciel « Planning », on simule grâce aux éphémérides, la position des satellites dans le ciel à la date prévue pour l'intervention. Au 21 mai, on remarque que le nombre de satellites est supérieur à 6 après 10 heures avec un maximum prévu pour la période 12h30-13h et 16h-17h ce qui permettra des mesures de GPS correctes.

C. Reconnaissance terrain

10) Évaluer les disponibilités et contraintes du lieu

Du fait du choix du lieu dans le cas particulier de notre site de tests, la reconnaissance terrain est facilitée.

Contraintes:

- présence de pylônes en béton du côté du mur Est ;
- petite gêne pour la réception du signal GPS due à la hauteur des murs.

Atouts:

- proximité avec l'atelier pour le transport et la manutention du drone ;
- zone dégagée facilitant la navigation du drone ;
- champ ouvert pour le décollage/atterrissage.

11) Réaliser une cartographie succincte pour le plan de vol

La zone du site de tests avait déjà été cartographiée comme l'illustre la figure 39. Ce plan a donc servi de base pour la constitution du plan de vol du drone. On a toutefois relevé quatre points au GPS afin de permettre la géolocalisation du plan.

12) Implanter les points des sommets de la polygonale

Il a simplement été plantés deux clous de géomètre dans la partie goudronnée située autour des deux murs.

D. Pré-traitements

13) Coordonnées des points levés

On calcule grâce au logiciel GNSS Solution les coordonnées des quatre points de calage utilisés pour le géoréférencement de l'image constituant le plan de vol du drone, cf. tableau 4.

Point	Longitude (deg)	Latitude (deg)
P1	-1,63745000	47,15540000
P2	-1,63653333	47,15550000
P3	-1,63673333	47,15680000
P4	-1,63758333	47,15678333

Tableau 4: Coordonnées WGS84 des points de calage

14) Constitution du plan de vol

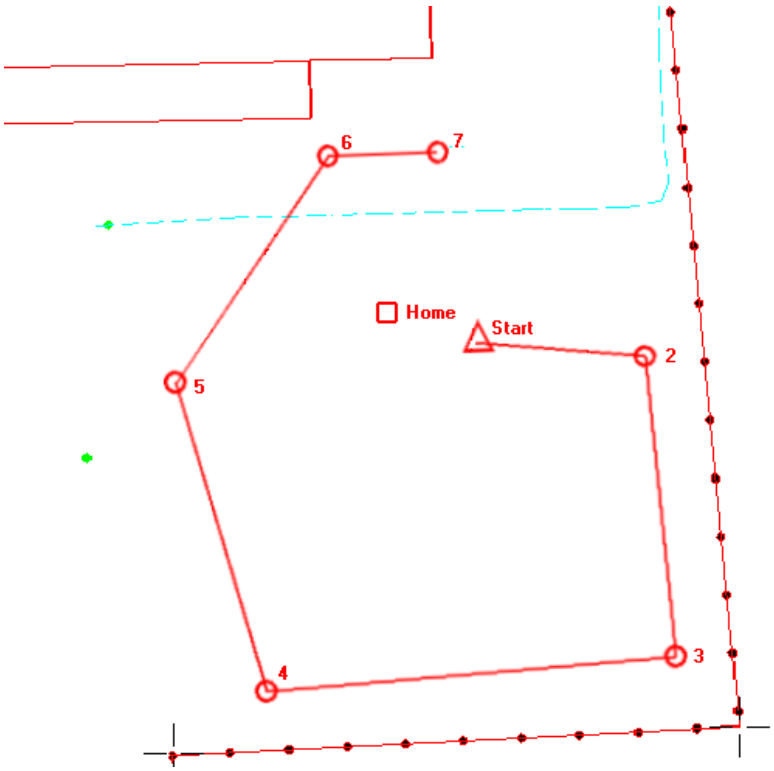


Figure 41: Plan de vol sur le site de tests

On crée une image .bmp géoréférencée puis on détermine, à l'aide du logiciel du drone, les points « start » et « home » pour le décollage et l'atterrissage du drone ainsi que les divers « points stop » qui détermineront l'itinéraire suivi et sur lesquels le drone s'immobilisera (cf. figure 41).

Afin de maitriser la navigation du drone et vérifier son bon fonctionnement, il est généralement prévu une boucle (points 2 à 6) avant l'observation réelle de la zone d'intérêt (mur face aux points 6 et 7).

E. Intervention terrain

15) Préparation du drone pour un vol

Mise en place du matériel (de gauche à droite) :

- écran affichant le champ observé par l'appareil photo ou la caméra ;
- commande de déclenchement des photos ;
- valise de commande ;
- ordinateur affichant les informations de navigation du drone ;
- récepteur et émetteur du signal échangé entre le drone et l'utilisateur.

Figure 42: Pupitre de commande du drone

L'intervention débute par la mise en place de tout le matériel nécessaire à la navigation du drone ainsi qu'à l'acquisition de ses données.

16) Vol du drone

Après vérification du fonctionnement de tous les appareils ainsi que la préchauffe du drone pour le décollage, tous les voyants passent au vert signalant la possibilité de décoller.

Figure 43: Drone en vol sur le site de tests

Lorsque le drone a atteint le point stop numéro 6 (cf. figure 41), il est alors dirigé manuellement pour permettre l'acquisition des clichés selon les critères photogrammétriques définis précédemment. Du fait d'un système de récupération des données de navigation pas encore opérationnel, les coordonnées et l'attitude du drone ont été relevés manuellement.

On signalera également dans ce type de manipulation, la difficulté de positionner le drone à un endroit précis dans l'espace et de maîtriser les déplacements relatifs pour l'acquisition des clichés selon les contraintes photogrammétriques imposées.

17) Dépouillement des données

Ce dépouillement a consisté à vider les images de la carte mémoire pour vérifier la qualité des photos réalisées ainsi que le respect des conditions stéréoscopiques.

18) Levé des points d'appui

Suite à la réalisation de ce vol, un levé topographique a été réalisé quelques jours plus tard pour relever les points d'appui sur les murs.

Matériel utilisé: tachéomètre SOKKIA Net2 du LCPC.

Cette station totale (cf. figure 44) de haute précision (±0,8mm + 1ppm*D(mm)) utilise des cibles réfléchissantes (cf. figure 45) pour la mesure de distance. L'absence de visée laser nous a donc contraint à utiliser la nacelle élévatrice du laboratoire pour effectuer le levé des cibles.

Figure 44: Tachéomètre

Figure 45: Réflecteur

F. Traitement au bureau

19) Calcul des coordonnées compensées des points d'appui

Les coordonnées des points d'appui (cibles) des murs Sud et Est ont été déterminés grâce à un logiciel accompagnant la station totale Sokkia et sont données dans un référentiel local défini par son origine (cible numéro 112) et ses trois axes (l'axe X est dirigé vers l'ouest parallèlement au mur, l'axe Y est dirigé vers le sud perpendiculairement au mur et l'axe Z est dirigé vers le haut le long du mur).

		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
MUR	101	13476	-24	7185
MUR	102	9012	-9	7181
MUR	103	4491	-10	7182
MUR	104	9	-16	7177
MUR	105	13508	-5	3555
MUR	106	9008	11	3560
MUR	107	4496	-3	3553
MUR	108	10	-13	3546
MUR	109	13508	0	5
MUR	110	9002	10	8
MUR	111	4502	1	2
MUR	112	0	0	0
MUR	113	-632	-633	7180
MUR	114	-627	-4807	7179
MUR	115	-627	-636	3543
MUR	116	-623	-4828	3542
MUR	117	-623	-632	-9
MUR	118	-627	-4821	-9

Tableau 5: Coordonnées locales des points d'appui

La connaissance de ces points répartis de façon homogène sur le site et connus en coordonnées dans le repère local (cf. tableau 5) nous permettra d'effectuer la mise à l'échelle et le calage du modèle lors du calcul d'orientation externe.

20) Transformation des coordonnées dans le système adéquat

Étapes de traitement des coordonnées:

- Les coordonnées géographiques (λ, φ, h) de navigation relevées par le GPS du drone sont tout d'abord transformées en coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) en utilisant les paramètres de l'ellipsoïde du WGS84.

- A partir des 4 clous implantés au sol dont les coordonnées ont été déterminées dans le système local et par GPS, on calcule les paramètres de transformation (3 rotations, 3 translations, 1 facteur d'échelle) passant d'un repère à l'autre.

- On applique cette transformation aux coordonnées de navigation (centres de prise de vue des différents clichés) pour obtenir tous les points définis dans le repère local choisi.

- Un dernier changement de repère est appliqué pour se placer dans des conditions de calculs photogrammétriques plus favorables, c'est à dire avec l'axe Z dans la direction de l'axe optique et l'axe X dans le sens de déplacement du drone.

Toutes ces étapes permettent alors de créer les fichiers de navigation et de points d'appui dans le format exigé par le logiciel *Interface*.

21) Traitement des données sous le logiciel *Interface*

A partir des données transformées, il est possible de réaliser la chaîne de traitement photogrammétrique proposée par le logiciel *Interface*.

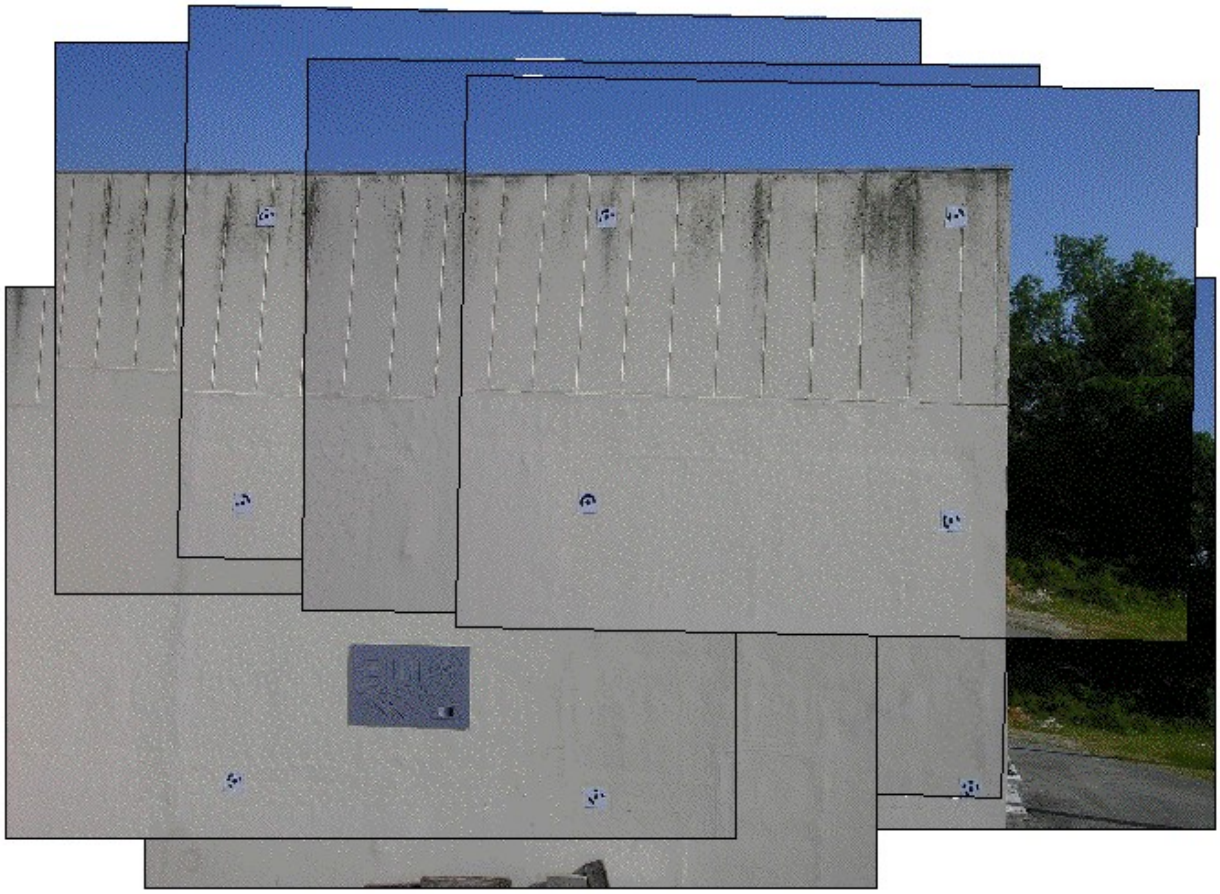


Figure 46: Mosaïque des images du site de tests

Du fait des nombreuses difficultés rencontrées lors de la navigation du drone dues principalement, à la coordination entre la personne procédant aux déplacements du drone et celle responsable de l'acquisition des images ainsi qu'à la nécessité de noter manuellement les coordonnées du drone à chaque prise de vue, seules 8 photos du mur côté Sud sont dans des conditions photogrammétriques permettant leur exploitation. Elles sont disposées en deux bandes horizontales, chaque bande étant composée de quatre images qui sont présentées ici sous la forme d'une mosaïque d'images (cf. figure 46).

Etapes de calculs :

1. **Dépouillement sommaire**

La première étape a consisté à calculer le graphe d'images. Celui-ci permet la formation des couples de photos selon la présence ou l'absence de zones de recouvrement.

2. **Calcul du modèle**

Le détecteur SIFT a identifié 208 points de liaison sur les 8 images du chantier.

Il a été mesuré par ailleurs, les coordonnées-image des 9 points d'appui (cibles).

Les paramètres de l'orientation externe sont donc au nombre de 6 ($\omega,\varphi,\kappa,X_0,Y_0,Z_0$) pour chacune des 8 images, soit 48 paramètres. A ces inconnues s'ajoutent les coordonnées (X,Y,Z) des 208 points de liaison, ce qui donne au total 672 inconnues.

Considérant les points d'appui comme des observations pour le calcul de compensation, on ajoute donc 3 (X,Y,Z) x 9 points d'appui, soit 27 paramètres, aux 672 précédents. On obtient finalement un nombre d'inconnues de 699. Avec un nombre d'observations de 929 prenant en compte toutes les mesures des points (points de liaison et points d'appui) sur chacune des images, on obtient un degré de liberté de 929 – 699 = 230 ce qui offre une redondance suffisante pour le calcul de compensation.

3. Compensation

Le calcul de compensation par faisceaux a été réalisé sous le logiciel *TopAero* avec la configuration illustrée à la figure 47 :

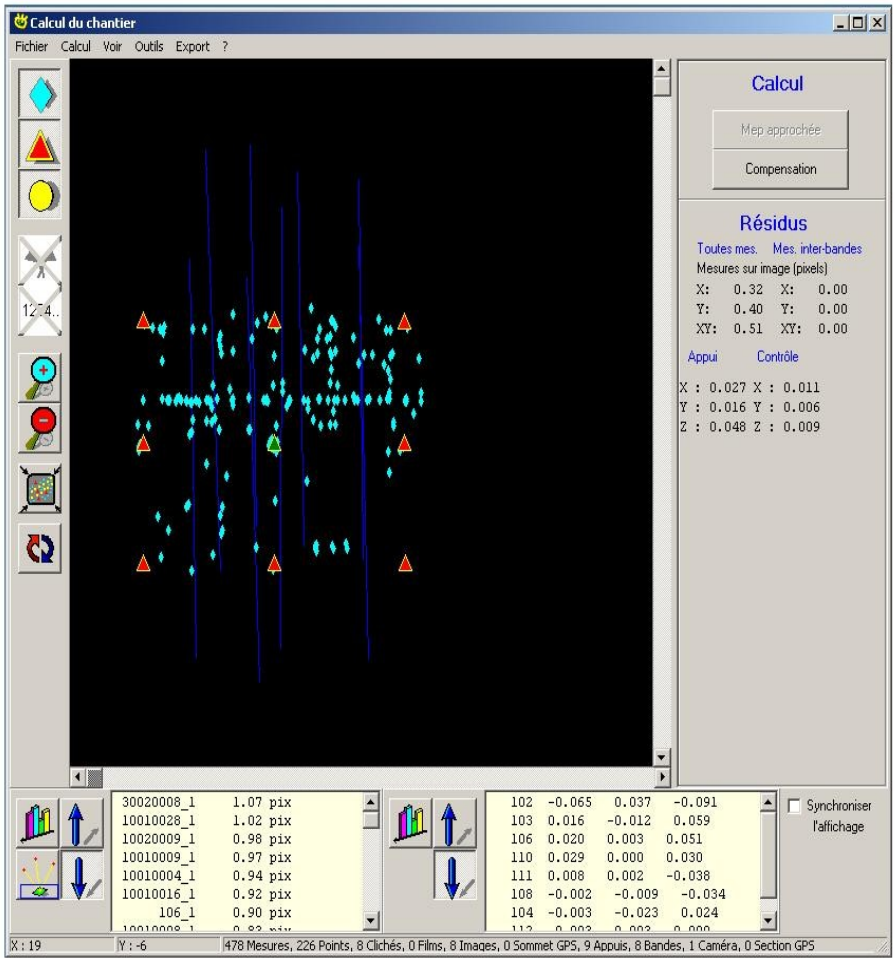


Figure 47: Illustration de la compensation réalisée sous TopAero

Les points d'appui (cibles 102, 103, 104, 106, 108, 110, 111 et 112) sont représentés par un triangle rouge.
Les points de contrôle (cible 107) sont représentés par un triangle vert.
Les points de liaison sont représentés par des losanges bleus.
La convergence du calcul au sens des moindres carrés a été obtenue après 16 itérations avec des résidus sur les observations inférieurs au pixel et des résidus sur les points d'appui de l'ordre du centimètre.

4. Restitution photogrammétrique

Grâce aux positions et aux orientations compensées des centres de prises de vues des 8 photos, il a été réalisé la stéréorestitution des désordres observés sur le panneau de tests, cf. figure 48.

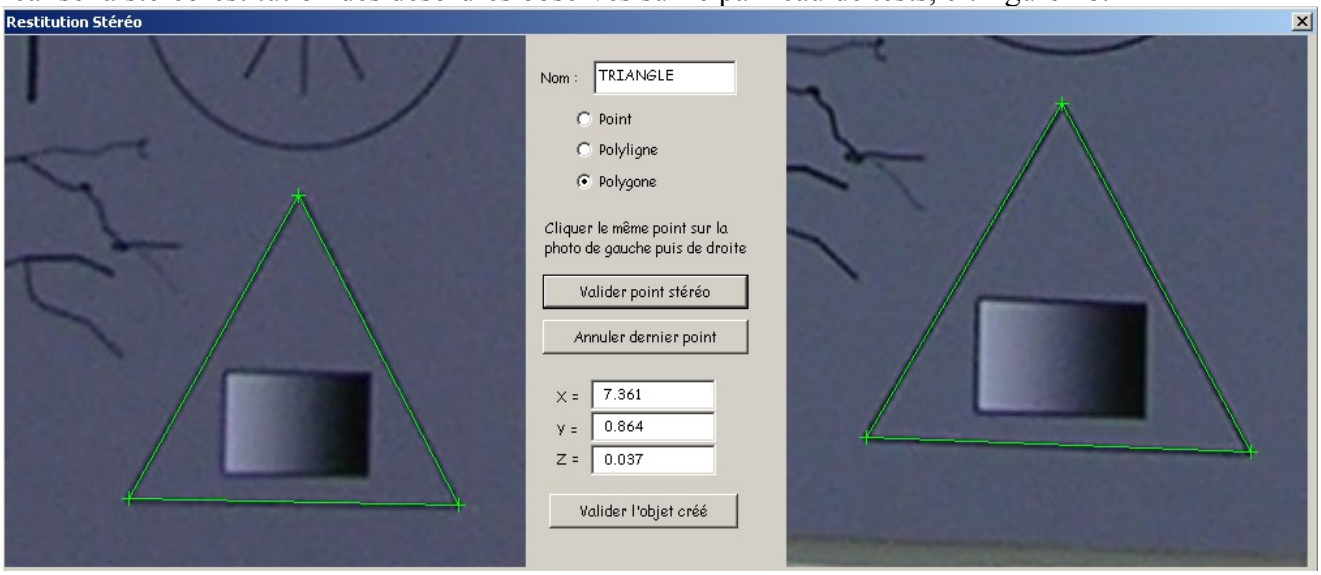


Figure 48: Restitution photogrammétrique des désordres du panneau de tests

5. Inspection

Les coordonnées tridimensionnelles des objets restitués ont ensuite été enregistrées dans un fichier et une analyse détaillée est donnée dans la partie suivante.

Grâce à la création d'un site de tests, nous avons pu réaliser une expérimentation « type » des chantiers de géolocalisation et obtenir ainsi un certain nombre de résultats. Ces derniers vont nous permettre, au moyen d'une analyse détaillée présentée dans la partie suivante, de conclure sur l'ordre de grandeur des précisions qui est atteint lorsque les conditions sont optimales.

V. Évaluation de la précision de la géolocalisation

Cette partie réalise tout d'abord une analyse des résultats obtenus pour l'expérimentation menée sur le site de tests. Une étude de précision est ensuite exposée afin d'évaluer la précision de la géolocalisation qui est atteinte grâce aux traitements du logiciel *Interface*. Un dernier point d'analyse est enfin donné grâce à une comparaison réalisée entre les logiciels *Interface* et *Photomodeler*.

V.1. Analyse des résultats

L'analyse des résultats se décompose en une première évaluation de la qualité des images obtenues par le drone puis en une analyse de l'orientation externe, étape principale de la chaîne photogrammétrique, et enfin des coordonnées obtenues par restitution.

a) Évaluation de la qualité des images

On rappelle tout d'abord que les réglages de l'appareil photo pour ce vol étaient les suivants:

- vitesse d'obturation fixée à 1/1000 ;
- ouverture moyenne de 5 ;
- focale 8,9mm ;
- format de compression jpeg fine ;
- résolution 3264x2448pixels ;
- mise au point à l'infini ;
- netteté désactivée ;
- balance des blancs automatique ;
- sensibilité ISO 50 ;
- mesure « pondérée centrale ».

D'un point de vue global, on observe que les photographies acquises par le drone sont de bonne qualité et ne présentent plus les effets de flou marqués comme il avait été le cas lors des précédents chantiers. Cela permet de conclure que l'étude photographique concernant les réglages à effectuer a été profitable. Par une analyse plus détaillée, on s'aperçoit toutefois d'un étalement des pixels qui est dû principalement au flou de bougé opéré par les vibrations du drone mais également, à une compression des images et même au capteur CCD lui-même.

trait 1mm *trait 3mm* *trait 6mm* *trait 8mm* *trait 10mm*

Figure 49: Traits verticaux observés à partir du drone

Si l'on procède à une mise à l'échelle, on peut calculer la taille réelle d'un pixel. Dans le cas des extraits d'images de la figure 49, un pixel-terrain mesure 3,2 mm. Selon l'interprétation qui est faite

sur le nombre de pixels à prendre en considération pour chaque trait, on observe que l'erreur que l'on peut commettre dans la détermination de l'épaisseur des différents traits varie de 0,2 à 8,0 mm, cf. tableau 6.

Trait (mm)	Nombre de pixel	Taille (mm)	Erreur (mm)
1	impossible à déterminer		
3	1 à 3	3,2< p <9,6	0,2< e <6,6
6	2 à 4	6,4< p <12,8	0,4< e <6,8
8	3 à 5	9,6< p <16,0	1,6< e <8,0
10	3 à 5	9,6< p <16,0	0,4< e <6,0

Tableau 6: Estimation de l'erreur commise pour chaque trait

La problématique que l'on identifie dans cette technique est le problème du comptage approprié des pixels afin d'affiner les résultats et de se rapprocher de la valeur réelle. Pour chaque trait représenté sur la figure 59, on peut observer qu'il occupe un certain nombre de pixels sur l'image, du fait de la différence de niveau de gris entre le trait et le fond. Cependant, on remarque également que ces pixels ont une intensité plus ou moins forte d'où cette difficulté d'estimer la position de la limite entre trait et fond. Il pourrait donc être intéressant de développer une méthode sub-pixellique. Toutefois, même en prenant en compte cette amélioration, la mesure de désordres dont la taille est inférieure au millimètre restera extrêmement difficile, voire impossible, avec cette configuration de prise de vues. On pourra au mieux donner une classification entre objets de taille millimétrique ou supérieure.

Outre le problème d'estimation de l'épaisseur d'un objet, la résolution de l'image sera également une limite pour le pointé des différents points sur l'image et pour l'attribution de leurs coordonnées (x, y).

b) Analyse du calcul d'orientation externe

Concernant les calculs qui ont été réalisés par le logiciel *Interface* ainsi que par le logiciel *TopAero*, on peut déjà remarquer le nombre important d'itérations qui ont été nécessaires pour obtenir la convergence du calcul de compensation. Plusieurs explications sont envisageables pour justifier la difficulté de convergence rencontrée lors de ce calcul. Une première provient de la qualité médiocre des informations d'orientation mais surtout de position fournies par le GPS du drone (figure 50) et qui sont utilisées comme valeurs approchées pour l'initialisation du calcul.

Comparaison des positions des prises de vues avant et après compensation:

Num	**Xloc**	**Yloc**	**Zloc**	**Xcomp**	**Ycomp**	**Zcomp**	e(X)	e(Y)	e(Z)
2h	5,778	4,687	9,989	8,229	5,408	10,210	-2,451	-0,721	-0,221
3h	7,434	4,687	10,223	9,419	5,445	9,146	-1,985	-0,758	1,077
4h	9,282	4,687	9,913	10,911	5,040	9,032	-1,629	-0,353	0,881
5h	11,830	4,686	10,436	13,078	4,728	9,164	-1,248	-0,042	1,272
11b	11,384	1,686	10,291	13,171	2,234	10,005	-1,787	-0,548	0,286
12b	8,065	1,686	10,938	10,482	2,321	10,526	-2,417	-0,635	0,412
13b	5,585	1,687	10,532	9,533	1,427	9,725	-3,948	0,260	0,807
14b	3,788	1,687	11,180	7,121	2,185	9,657	-3,333	-0,498	1,523

Tableau 7: Positions des centre de prises de vues avant et après compensation

On observe des écarts entre les coordonnées approchées (gauche) et les coordonnées compensées (droite) des positions des centres de prises de vues pouvant aller jusqu'à 4 m (cf. tableau 7).

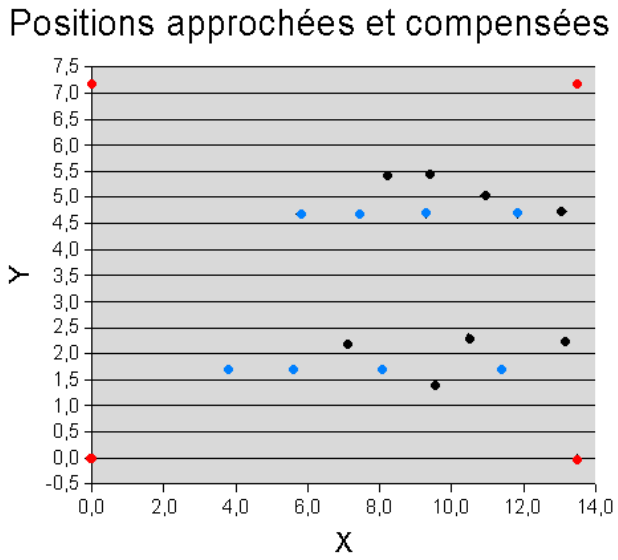


Figure 50: Erreurs de positions des prises de vues

Cela est cohérent avec la précision que l'on peut attendre d'un GPS en mode naturel. Cependant, considérant la dimension du chantier, de tels écarts peuvent être suffisants pour entraîner la divergence du calcul. Il serait donc recommandé de se munir de coordonnées approchées plus précises au départ pour n'avoir qu'à corriger des erreurs d'une dizaine de centimètres au maximum, ceci afin de garantir une convergence sûre vers la solution finale.

Un deuxième élément pouvant être responsable de la divergence du calcul est la présence d'observations fausses. En effet, la méthode de résolution par les moindres carrés n'est pas une méthode robuste face à ce problème. Or les points de liaison ont été mesurés de façon automatique à l'aide du détecteur SIFT qui permet la détection et la mise en correspondance de points d'intérêt homologues. Malgré l'efficacité prouvée de ce détecteur, il reste un pourcentage d'erreurs relativement important qui peut être suffisant pour gêner la résolution du système d'équations.

c) Analyse des coordonnées obtenues par restitution

Concernant à présent les résultats obtenus par la restitution des différents défauts représentés sur le panneau de tests et dont on a levé précédemment les coordonnées grâce au tachéomètre, on peut analyser la qualité de la géolocalisation.

	Coordonnées issues de la restitution				Coordonnées issues du levé topographique				Ecarts observés (en mm)			
	X	Y	Z	Dist	X	Y	Z	Dist	dX	dY	dZ	dDist
Hztal1_g	6,046	1,670	0,020		6,060	1,668	0,012		-14	2	8	
Hztal1_d	6,299	1,671	0,050	0,255	6,312	1,668	0,012	0,254	-13	3	38	1
Hztal6_g	6,042	1,460	0,016		6,058	1,462	0,013		-16	-2	3	
Hztal6_d	6,296	1,461	0,025	0,255	6,311	1,462	0,014	0,254	-15	-1	11	1
Hztal10_g	6,043	1,247	0,024		6,058	1,247	0,014		-15	0	10	
Hztal10_d	6,295	1,248	0,030	0,252	6,312	1,246	0,015	0,254	-17	2	15	-2
EtoileC	7,161	1,469	0,029		7,177	1,467	0,013		-16	2	16	
Vert6_g	6,605	1,571	0,017		6,620	1,571	0,011		-15	0	6	
Vert6_d	6,605	1,323	0,032	0,249	6,620	1,318	0,013	0,253	-15	5	19	-4
Triangle_bg	6,956	0,864	0,027	0,404	6,967	0,862	0,012	0,402	-11	2	15	2
Triangle_h	7,158	1,211	0,028	0,402	7,173	1,213	0,013	0,402	-15	-2	15	0
Triangle_bd	7,360	0,863	0,037	0,402	7,377	0,860	0,010	0,402	-17	3	27	0
Fissure1	6,294	1,162	0,022		6,313	1,162	0,015		-19	0	7	
Fissure2	6,931	1,119	0,027	0,639	6,948	1,118	0,013	0,640	-17	1	14	-1
MOYENNE									**-15,5**	**1,0**	**14,6**	**-0,4**

Tableau 8: Comparaison des coordonnées obtenues par restitution et par levé topographique

Ces résultats, exposés dans le tableau 8, montrent la présence d'une erreur systématique dans le calcul des coordonnées car on remarque que les écarts en X sont tous de signe négatif et d'une valeur proche de 16 mm et que les écarts en Z sont tous positifs et d'une valeur moyenne de 15 mm. En mesures relatives illustrées par les calculs de distance, on observe cependant que ce biais est absorbé et que la

restitution donne alors des résultats très corrects. Seules les erreurs accidentelles rentrent en jeu.

V.2. Étude de précision

En introduction de cette étude de précision, on établira tout d'abord un bilan des erreurs qui permettra de comprendre l'origine des différentes erreurs qui s'accumulent tout au long du processus de calcul puis on donnera une estimation la précision finale de la géolocalisation.

a) Bilan des erreurs

Le bilan des erreurs est présenté en décomposant les étapes principales réalisées pour atteindre les coordonnées terrain des désordres d'ouvrages.

- Précision des données de départ :

Lors du levé topographique des points d'appui, une erreur est d'ores et déjà à considérer afin de prendre en compte la précision du tachéomètre ainsi que le mode opératoire employé. Dans les conditions qui furent mises en œuvre, on peut estimer, de façon assez pessimiste, la précision d'un point à ±5 mm. Les autres données de départ sont les positions et attitudes des centres de prises de vues fournies par le drone. Ces données présentent une erreur importante mais n'influencent pas directement la précision finale car elles ne servent que de valeurs approchées pour l'initialisation du calcul de compensation. On note aussi la présence d'erreurs résiduelles au niveau des paramètres de la distorsion et de la focale estimés lors de la calibration de l'appareil photo.

- Calcul de compensation :

Le calcul de compensation réalisé permet d'obtenir les coordonnées des points de liaison ainsi que les coordonnées et attitudes de chaque cliché. Toutes ces inconnues sont aussi entachées d'erreurs, que l'on estime grâce à un calcul d'erreur moyenne quadratique (mq) lors de la compensation.

(9) $mq_X = mq_0 \sqrt{Q_{XX}}$ où mq_0 est l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids et Q_{XX} est le cofacteur relatif à l'inconnue X.

- Restitution photogrammétrique :

A cette étape, on comptera essentiellement les erreurs de pointé sur l'image ainsi que les erreurs dues à l'orientation des clichés issues du calcul de compensation.

Une estimation pourrait être donnée pour les erreurs concernant les paramètres d'orientation interne et externe ainsi que pour l'erreur de pointé. Cependant il est extrêmement difficile d'en déduire, par calcul théorique, la précision des coordonnées finales car ces dernières sont issues d'une succession de calculs trop complexes pour que la transmission d'erreurs puisse être appliquée directement. La précision des coordonnées sera donc estimée de façon pratique grâce à l'utilisation d'un échantillon de points.

b) Calcul de précision

Afin de poursuivre cette étude de précision, on rappelle brièvement la relation qui existe entre

la justesse et la fidélité pour un résultat (figure 51). Lorsqu'une grandeur particulière, dite mesurande, est soumise à plusieurs mesurages réalisés sous des conditions similaires, on peut alors évaluer ces deux paramètres. La fidélité sera l'étroitesse de l'accord entre les différents résultats indépendants obtenus sous les conditions déterminées pour le mesurage. Elle est exprimée sous forme d'un écart-type ou d'un coefficient de variation. En revanche, la justesse sera l'étroitesse entre la valeur moyenne issue de la série de mesurage et la valeur de référence acceptée. Elle est généralement donnée par une valeur de biais (Garnier [2007]).

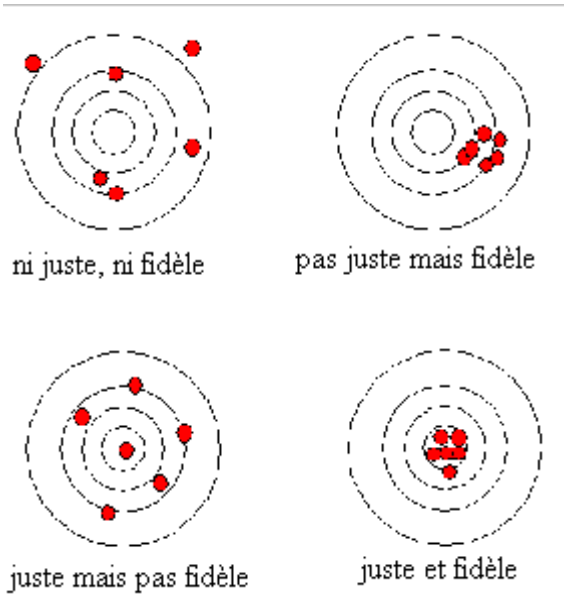


Figure 51: Justesse et fidélité

Grâce aux données issues de la restitution et aux coordonnées levées au tachéomètre, on s'attachera donc, dans cette étude, à évaluer la fidélité ainsi que la justesse du système de restitution photogrammétrique mis en œuvre, ce qui garantira la précision de la géolocalisation des désordres.

Une première étude a ainsi été réalisée en se limitant à l'analyse d'un point particulier (sommet inférieur gauche du triangle représenté sur le panneau de tests, cf. figure 52). Les coordonnées de ce point ont été déterminées, d'une part, par calcul avec le logiciel *Interface* et, d'autre part, à l'aide du levé au tachéomètre. Ainsi, nous possédons une valeur (X,Y,Z) calculée par restitution et une valeur de référence dite nominale (X_{ref},Y_{ref},Z_{ref}) permettant l'évaluation de la précision globale.

On suppose que les valeurs de référence sont des variables aléatoires qui suivent la loi normale $N(m_{ref},\sigma_{ref})$ où m_{ref} est la moyenne des coordonnées déterminées par le tachéomètre et σ_{ref} est l'écart-type associé qui caractérise la précision du levé. Compte tenu qu'il n'a été fait qu'une seule détermination du point par le tachéomètre, celle-ci sera prise comme la valeur moyenne. De plus, le mode opératoire et l'instrument utilisé nous a permis d'estimer la précision du levé topographique à ±5 mm (fixé) pour chacune des composantes X, Y et Z.

	Xref	Yref	Zref
MOYENNE	6,967 m	0,862 m	0,012 m
ECART-TYPE	± 5 mm	± 5 mm	± 5 mm

Tableau 9: Moyenne et écart-type de référence

Par ailleurs, on suppose de la même façon que les valeurs mesurées par restitution sont également des variables aléatoires qui suivent la loi normale $N(m,\sigma)$ où m est la moyenne d'une série de mesures réalisées sur ce même point et σ est l'écart-type associé à cette série qui traduit l'erreur de

pointé.
Pour une série de n mesurages, ces deux paramètres sont calculés grâce aux formules suivantes :

- la moyenne (10) $m = \frac{1}{n}\sum x_i$ où i = 1 à n

- l'écart-type (11) $\sigma = \sqrt{\frac{\sum ((x_i - m)^2)}{(n-1)}}$ où i = 1 à n

Dans le cas de notre étude, il a été réalisé 10 mesurages du sommet du triangle :

Mesure	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	6,9569	0,8637	0,0277
2	6,9570	0,8644	0,0327
3	6,9597	0,8657	0,0298
4	6,9581	0,8649	0,0220
5	6,9583	0,8642	0,0273
6	6,9574	0,8647	0,0293
7	6,9569	0,8633	0,0261
8	6,9583	0,8655	0,0304
9	6,9569	0,8664	0,0313
10	6,9582	0,8646	0,0255
MOYENNE	**6,9578**	**0,8647**	**0,0282**
ECART-TYPE	±0,9mm	±0,9mm	±3,2mm

Tableau 10: Moyenne et écart-type du point sélectionné

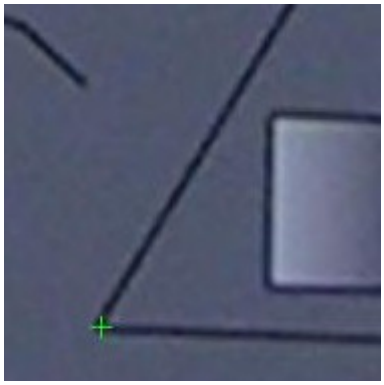


Figure 52: Sommet inférieur gauche du triangle

On obtient ainsi une valeur moyenne et une valeur d'écart-type pour chaque composante (X,Y,Z) qui traduit le caractère de fidélité. On observe que l'erreur de pointé est de l'ordre du millimètre (0,9 mm en X, 0,9 mm en Y et 3,2 mm en Z) ce qui est plutôt fidèle.

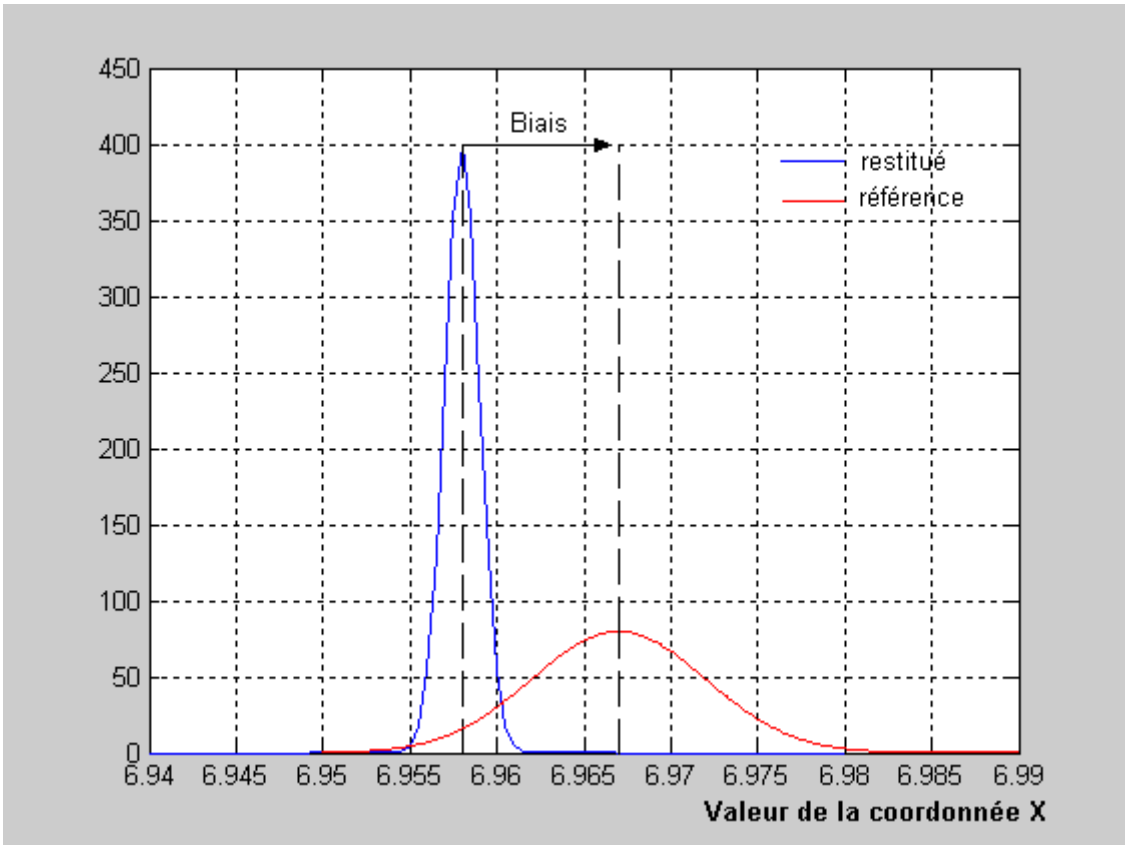


Figure 53: Courbe de Gauss de la coordonnée X issue de la restitution et du tachéomètre

Ces différentes erreurs peuvent être représentées par des courbes de Gauss dont l'équation est déterminée par la valeur moyenne m et l'écart-type σ :

$$(12) \quad f(x)=\frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})}e^{\frac{-1}{2}\left(\frac{(x-m)}{\sigma}\right)^2}$$

Il est donné comme exemple, sur le graphique de la figure 53, les erreurs observées par restitution et par tachéomètre (référence) de la composante X.

Le caractère de justesse est alors donné par la valeur du biais calculée par différence entre la valeur moyenne des mesures m et celle de référence m_{ref}.
Ainsi on obtient : Biais en X = 6,958 – 6,967 = -0,009 m soit **–9 mm** ;
Biais en Y = 0,865 – 0,862 = -0,003 m soit **–3 mm** ;
Biais en Z = 0,028 – 0,012 = 0,016 m soit **16 mm**.

Cette erreur systématique observée sur ce point au travers du biais peut avoir différentes sources d'erreurs. Afin d'évaluer plus précisément cette erreur, on a répété l'opération précédente sur plusieurs points du panneau de tests, cf. figure 54.

	Biais observés (en mm)		
	dX	dY	dZ
Hztal1_g	-16	1	5
Hztal1_d	-15	2	10
Hztal6_g	-15	2	14
Hztal6_d	-16	3	4
Hztal10_g	-17	1	8
Hztal10_d	-13	3	15
Vert1_g	-15	3	0
Vert1_d	-15	6	11
Vert6_g	-17	2	7
Vert6_d	-18	4	17
Vert10_g	-16	6	9
Vert10_d	-16	1	17
EtoileC	-12	1	13
Triangle_bg	-9	-3	16
Triangle_h	-13	-1	16
Triangle_bd	-17	2	21
Fissure1	-19	0	3
Fissure2	-18	1	16
	-16	**2**	**11**

Tableau 11: Série de mesures du biais observé

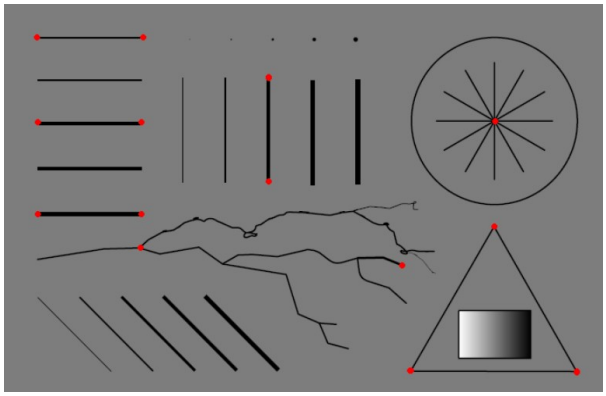


Figure 54: Points utilisés pour la mesure du biais

On obtient ainsi une série de mesures permettant de donner une estimation du biais observé lors de la restitution photogrammétrique (cf. tableau 11).

En supposant que la valeur du biais suit également la loi normale $N(m_{biais}, \sigma_{biais})$ avec m_{biais} , la moyenne des écarts observés entre les moyennes des valeurs mesurées et les valeurs de référence et σ_{biais} , l'écart-type associé à cette série, on détermine ces deux paramètres pour chacune des composantes X, Y et Z :

	BIAIS X	**BIAIS Y**	**BIAIS Z**
MOYENNE	- 16 mm	2 mm	11 mm
ECART-TYPE	± 1,7 mm	± 1,7 mm	± 5,9 mm

Tableau 12: Moyenne et écart-type du biais observé

Afin d'apporter un contrôle supplémentaire, la cible numéro 7 qui est visible sur l'ensemble des clichés a été restituée successivement pour chaque couple d'images du chantier (cf. tableau 13). On remarque que les coordonnées obtenues, pour chaque couple de photos considéré, sont très proches ce qui prouve, dans un premier temps, une bonne cohérence dans le calcul de l'orientation externe puis, dans un second temps, lorsqu'on compare les valeurs moyennes obtenues à celles de référence, la présence à nouveau d'un biais (-12 mm en X, 7 mm en Y et -6 mm en Z).

Couple photos	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 11	11 – 12	12 – 13	13 – 14	MOYENNE	ECART-TYPE
X (m)	9,002	9,002	8,997	9,002	9,001	8,998	8,998	9,000	0,002
Y (m)	3,551	3,554	3,551	3,550	3,552	3,555	3,550	3,552	0,002
Z (m)	-0,005	0,001	-0,015	-0,006	-0,007	-0,020	-0,011	-0,009	0,007

Tableau 13: Coordonnées restituées de la cible 7 par plusieurs couples stéréoscopiques

Dans le but d'améliorer la précision finale des coordonnées, on peut corriger l'erreur systématique en soustrayant la valeur moyenne du biais aux coordonnées issues de la restitution. On obtient :

$$X_{final} = X_{restitué} - Biais \quad (13)$$

L'erreur finale réalisée sur la valeur corrigée est donc :

$$E_X = X_{final} - X_{ref}$$

$$E_X = X_{restitué} - Biais - X_{ref} \quad (14)$$

D'où,

$$\sigma^2(E_X) = \sigma^2(X_{restitué}) + \sigma^2(Biais) + \sigma^2(X_{ref}) \quad (15)$$

Cela permet d'estimer la précision finale à :

	X	Y	Z
ECART-TYPE	± 5,3 mm	± 5,4 mm	± 8,1 mm

Tableau 14: Précision finale des coordonnées

Le tableau 14 permet de conclure sur l'obtention d'une précision inférieure au centimètre pour le positionnement (X,Y,Z), ce qui semble tout à fait correct pour répondre à notre besoin de géolocalisation.

Si l'on s'intéresse à la longueur des défauts, les mesures effectuées sur les différents traits horizontaux, verticaux et obliques du panneau de tests montrent que les valeurs obtenues sont très proches des valeurs de référence car l'écart maximal observé est de 4 mm (cf. tableau 12). Le biais présent sur les coordonnées restituées a ainsi été éliminé dans le calcul de distance.
Ces mesures sont très intéressantes pour estimer la longueur d'un défaut. Cependant, la précision reste insuffisante pour mesurer correctement l'épaisseur d'un défaut de taille inférieure à quelques millimètres (fissures...).

	Dspa	Dvraie	ΔD (mm)
Hz3	0,252	0,254	-2
Hz6	0,251	0,254	-3
Hz8	0,255	0,254	1
Hz10	0,253	0,254	-1
Ob3	0,251	0,254	-3
Ob6	0,253	0,254	-1
Ob8	0,254	0,254	0
Ob10	0,251	0,254	-3
V3	0,250	0,254	-4
V6	0,250	0,254	-4
V8	0,251	0,254	-3
V10	0,252	0,254	-2

Tableau 15: Comparaison des mesures de distance

Par ailleurs, les écarts observés pour chaque type de trait ne permettent pas de conclure d'une direction privilégiée pour le flou de bougé dû aux vibrations du drone.

Quelques remarques peuvent cependant être faites quant à la validité de ces résultats. On note dans un premier temps, que l'échantillon choisi pour les calculs est réduit essentiellement à l'utilisation des points situés sur le panneau de tests. Du fait de la complexité d'utilisation du tachéomètre du laboratoire sur le mur de tests, le levé de points de référence a en effet, été réduit au minimum. Il serait donc recommandé d'élargir cet échantillon de points pour affiner les valeurs finales de précisions annoncées. Dans un second temps, on peut également rappeler que du fait du système de fixation du panneau (crochets dans le mur permettant d'accrocher ou de retirer le panneau), un petit écart de l'ordre du millimètre, voire davantage, peut intervenir dans sa position. Ceci peut donc participer également à la justification de l'écart systématique observé sur les coordonnées restituées.

V.3. Comparaison avec Photomodeler

De façon similaire au logiciel *Interface* développé dans ce projet, *Photomodeler* est un logiciel qui s'appuie sur les techniques de la photogrammétrie pour permettre la création de modèles d'objets à partir de photographies et qui permet également la réalisation d'un certain nombre de mesures sur ces modèles. Cependant, *Photomodeler* est un logiciel commercial qui nécessite l'achat d'une licence et dont on ne maîtrise que très peu les calculs réalisés et les résultats obtenus. Il a toutefois prouvé son efficacité et sera donc utilisé dans ce projet afin de valider les résultats obtenus précédemment avec le logiciel Interface.

Les 4 photographies contenant le panneau de tests ont donc été chargées, puis des points homologues ont été pointés sur les photographies (deux à deux). Du fait d'un calcul de compensation en deux étapes, il faut ensuite définir les paramètres de translation, rotation et facteur d'échelle afin de procéder à la mise à l'échelle du modèle jusqu'alors indépendant (cf. figure 55).

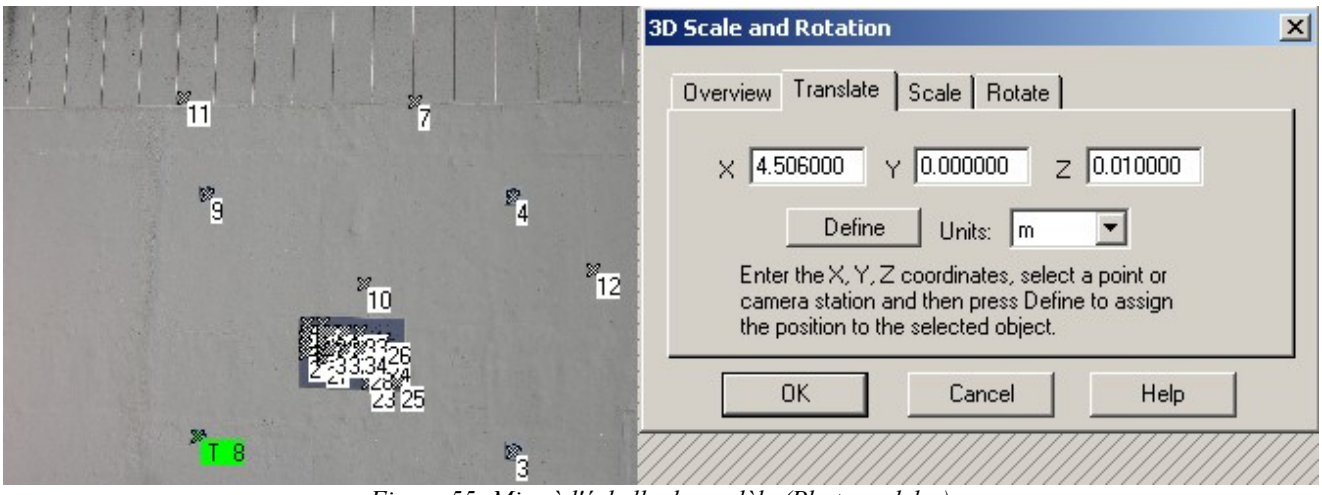


Figure 55: Mise à l'échelle du modèle (Photomodeler)

Le modèle en 3 dimensions du mur a ainsi été obtenu et des mesures ont pu être effectuées sur les défauts de notre panneau de tests (cf. Tableau 16). En comparant les coordonnées obtenues par *Photomodeler* avec les coordonnées mesurées avec le tachéomètre, on observe que les écarts sont relativement faibles pour les composantes X et Y qui sont les deux axes appartenant au plan du mur. Les écarts en Z sont quant à eux plus élevés ce qui peut s'expliquer par l'absence de profondeur dans notre objet et donc une mise à l'échelle plus difficile suivant cet axe.

	PHOTOMODELER			REFERENCE			ECARTS OBSERVES (mm)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	dX	dY	dZ
Hztal1_g	6,062	1,673	0,040	6,060	1,668	0,012	2	5	28
Hztal1_d	6,317	1,674	0,045	6,312	1,668	0,012	5	6	33
Hztal6_g	6,061	1,465	0,047	6,058	1,462	0,013	3	3	34
Hztal6_d	6,315	1,466	0,039	6,311	1,462	0,014	4	4	25
Hztal10_g	6,060	1,248	0,047	6,058	1,247	0,014	2	1	33
Hztal10_d	6,316	1,249	0,047	6,312	1,246	0,015	4	3	32
Vert1_h	6,418	1,577	0,043	6,413	1,570	0,013	5	7	30
Vert1_b	6,418	1,327	0,043	6,413	1,316	0,014	5	11	29
Vert6_h	6,621	1,577	0,027	6,620	1,571	0,011	1	6	16
Vert6_b	6,623	1,326	0,040	6,620	1,318	0,013	3	8	27
Vert10_h	6,839	1,574	0,032	6,837	1,563	0,011	2	11	21
Vert10_b	6,840	1,321	0,036	6,836	1,314	0,012	4	7	24
EtoileC	6,971	0,867	0,025	6,967	0,862	0,012	4	5	13
Triangle_bg	7,177	1,220	0,035	7,173	1,213	0,013	4	7	22
Triangle_h	7,380	0,868	0,032	7,377	0,860	0,010	3	8	22
Triangle_bd	7,177	1,472	0,031	7,177	1,467	0,013	0	5	18
Fissure1	6,313	1,165	0,033	6,313	1,162	0,015	0	3	18
Fissure2	6,951	1,126	0,035	6,948	1,118	0,013	3	8	22
MOYENNE							**3**	**6**	**25**

Tableau 16: Évaluation de la qualité des coordonnées fournies par Photomodeler

Si l'on compare, à présent, ces valeurs à celles qui ont été obtenues par le logiciel *Interface*, on s'aperçoit que la valeur du biais (en X et Y) est quasi inexistante dans les mesures réalisées avec *Photomodeler* et que le problème observé, concernant la présence d'une erreur systématique, est certainement dû à une imprécision réalisée lors d'une des étapes de la chaîne photogrammétrique du logiciel *Interface*.

Par ailleurs, *Photomodeler* annonce une précision d'environ ± 3 mm en X et Y et de près de ±8mm en Z pour l'ensemble des points mesurés. Les précisions obtenues par les deux logiciels sont donc du même ordre de grandeur, inférieures au centimètre, ce qui permet de conclure sur la satisfaction des résultats offerts par notre logiciel *Interface.*

Cette dernière partie conclue sur l'ordre de grandeur de la précision de géolocalisation qui est obtenue grâce aux divers traitements réalisés par le logiciel et valide ainsi l'efficacité de la méthode développée pour les chantiers menés à l'aide du drone d'hélicoptère. Cependant, elle fait également état de certains problèmes qui pourront faire l'objet de nouvelles améliorations et expérimentations, comme proposées dans les perspectives.

Conclusion

Ce projet de fin d'études avait pour objectif de mieux organiser les chantiers avec le drone d'hélicoptère du LCPC afin de permettre une géolocalisation des désordres d'ouvrages d'art et de confirmer ainsi l'utilité de cet outil dans la surveillance d'ouvrages. Le premier travail a donc été de rédiger une méthodologie complète et agrémentée de conseils pratiques. Celle-ci a permis notamment d'optimiser l'exécution de deux chantiers, un premier effectué dans la vallée d'Aspe pour l'observation d'un éboulement rocheux mais qui, du fait de problèmes techniques, n'a pas pu être achevé et un second, sur notre site de tests qui nous a permis de compléter et de valider la pertinence de cette méthodologie. Un second travail a consisté ensuite à améliorer la chaîne photogrammétrique déjà en place pour le traitement des images du drone. Ces améliorations ont été apportées au niveau de différentes étapes du processus, faisant l'objet d'une reprise du code existant et d'une programmation de nouveaux algorithmes en C++. Il a été introduit notamment une nouvelle fonctionnalité consistant à réaliser la reconnaissance automatique des points d'appui, ici matérialisés par des cibles codées. Cela a ainsi répondu en partie au besoin d'automatisation du processus. Par ailleurs, une méthode supplémentaire utilisant le redressement d'images a été implantée pour le cas de la monorestitution et une nouvelle présentation des résultats a été proposée pour l'analyse des coordonnées en fin de chaîne. Dans le but de compléter les étapes réalisées par le logiciel *Interface*, il a de plus été initié la programmation de l'algorithme de compensation par la méthode des faisceaux. Ces améliorations ont ainsi permis de réduire le temps de traitement mais également, grâce à la rédaction du manuel détaillé et illustré d'utilisation du logiciel, de faciliter la prise en main d'un nouvel utilisateur. Pour répondre aux différents objectifs fixés, un troisième travail a ensuite consisté à élaborer un projet de site de tests, depuis l'étape d'esquisse s'appuyant sur les besoins identifiés pour le drone jusqu'à l'étape finale de sa mise en place. Celui-ci a toutefois été conçu avec la possibilité d'être complété par de nouveaux équipements répondant aux nouveaux besoins du drone. De par ses cibles et son panneau de tests, il a ainsi rendu possible une expérimentation avec le drone et une étude de précision qui s'est avérée satisfaisante pour répondre à notre besoin de géolocalisation. En effet, les résultats obtenus dans les conditions d'observations du site de tests, que l'on peut qualifier de très satisfaisantes, ont permis de conclure sur des erreurs moyennes quadratiques des coordonnées inférieures au centimètre. Cela assure donc une localisation suffisamment précise des désordres sur l'ouvrage pour permettre le déploiement des équipements adéquats si le désordre observé a besoin de maintenance et dans le cas contraire, cela permettra de revenir sur sa localisation et de surveiller ainsi son évolution au cours des années. L'étude a également montré la possibilité de réaliser certaines mesures sur le désordre lui-même afin d'en déterminer sa longueur, sa surface ainsi que d'autres caractéristiques géométriques qui pourront d'ailleurs être complétées, par la suite, par des analyses d'images couleur, par exemple, détecter des zones oxydées. Néanmoins, la mesure de l'épaisseur de défauts tels que les fissures s'est avérée impossible compte tenu de la résolution des images. Finalement, afin de garantir la qualité des images acquises par le drone, un dernier travail a été mené sur les réglages de l'appareil photo du drone. Celui-ci s'est traduit par l'apport de différents conseils de prises de vues selon l'environnement du chantier, notamment au niveau de la vitesse d'obturation, pour limiter la présence de flou sur les images.

Tous ces éléments ont ainsi permis de consolider et de compléter une méthode de relevé des dégradations par photogrammétrie, ce qui nous laisse envisager de pouvoir fournir très prochainement un outil opérationnel et qui pourra être présenté aux différents gestionnaires d'ouvrages d'art. De plus, les champs d'applications pour le drone peuvent être étendus à de nombreux autres besoins comme celui de géotechnique pour les massifs rocheux, de dénombrement pour les enrochements ou encore de surveillance routière.

Perspectives

Ce projet a permis de montrer l'intérêt de la photogrammétrie pour ce type de chantier réalisé avec le drone d'hélicoptère du LCPC. Afin d'optimiser encore davantage le processus, on peut toutefois proposer plusieurs évolutions concernant la navigation du drone, certaines étapes du logiciel *Interface* puis l'utilisation d'une base de données.

Amélioration de la précision du positionnement du drone

Le drone possède actuellement un GPS offrant un positionnement absolu dont la précision est de l'ordre de la dizaine de mètres. Cela peut être suffisant pour sa navigation autour de l'ouvrage mais cette précision devient vite nettement insuffisante pour un grand nombre d'applications. On citera notamment le respect des bases horizontales et verticales calculées lors de la planification des paramètres photogrammétriques. En effet, la navigation précise du drone, comme par exemple le déport du drone de 3 mètres sur le côté, est encore très difficile car cette navigation se fait actuellement de manière entièrement visuelle d'où la présence par la suite de problèmes de recouvrement entre les clichés. L'intérêt d'améliorer la précision de positionnement du drone se trouve également dans le calcul du graphe d'images qui est la première étape du traitement et qui présente actuellement de nombreuses difficultés pour lier correctement les images entre elles. Enfin, une dernière motivation serait de pouvoir, dans le cas d'un positionnement d'une précision centimétrique, intégrer les coordonnées (X,Y,Z) ainsi que l'orientation (ω,φ,κ) de la caméra aux observations prises en compte pour le calcul de compensation. Cela permettrait en autre de réduire le nombre de points d'appui à lever sur l'ouvrage.

Le GPS du drone ne permettant pas d'être couplé à un autre GPS pour l'observation de mesures différentielles, une méthode pour améliorer son positionnement est proposée en utilisant un tachéomètre. En effet, il existe de nombreux modèles de tachéomètres qui possèdent la fonction « tracking », ce qui permettrait, en munissant le drone d'un réflecteur 360°, de suivre et connaître de façon précise la position du drone en temps réel. Cette technique pourrait s'avérer d'autant plus efficace que le drone doit parfois naviguer dans des zones difficiles d'accès, par exemple la partie inférieure des ponts, pour lesquelles le signal GPS est généralement extrêmement faible. L'utilisation d'un tachéomètre permet également de définir un repère local où l'on pourra définir l'orientation des axes et utiliser des coordonnées cartésiennes plutôt que géographiques, ce qui facilitera nettement la navigation du drone pour l'acquisition des images.

Répartition des points de liaison

A la base des calculs d'aérotriangulation, outre les points d'appui qui permettent le calage du modèle, on identifie également des points de liaison en plus grand nombre qui ont pour rôle de lier les photos entre elles. Pour une exploitation optimale de ces points homologues, ils sont généralement choisis proches des points de Von Grüber (figure 56), soit neuf zones dans l'image qui permettent une bonne répartition des points et consolident ainsi le modèle.

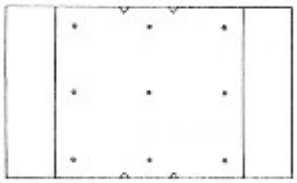


Figure 56: Points de Von Grüber

Cette technique était très utile dans le cas où les points de liaison étaient choisis manuellement sur chaque photo et que l'on souhaitait donc en limiter le nombre tout en maintenant une bonne précision. Avec l'utilisation d'images numériques et du détecteur SIFT qui permet d'identifier près de 500 points d'intérêt en une seconde, cette contrainte est minimisée. Toutefois, un nouveau problème

apparaît. Le nombre de points est bien souvent trop important ce qui génère des systèmes d'équations trop lourds à résoudre et un temps de calcul qui augmente. Il serait donc intéressant de trouver une méthode automatique qui permette d'effectuer un tri parmi ce nombre de points surabondant afin de garder un nombre de points réduit tout en garantissant une répartition homogène.

Deux critères permettant d'affecter un caractère prioritaire aux points peuvent être utilisés pour répondre à cette problématique. Un premier critère s'appuierait sur la multiplicité des points. En d'autres termes, il permettrait de sélectionner les points de liaison qui sont visibles sur un minimum de trois images ce qui consoliderait le modèle tridimensionnel. Un deuxième critère s'appuierait ensuite sur la position du point : l'image pourra être découpée en plusieurs cellules et le point se trouvant le plus proche du centre de la cellule considérée pourra être sélectionné, ceci garantissant une bonne homogénéité dans la répartition des points de liaison.

Robustesse de l'algorithme de compensation

Dans les améliorations logiciel, un point important serait de compléter le code, déjà mis en place pour sa plus grande partie, de l'algorithme de compensation par les faisceaux afin de résoudre les problèmes de convergence dont celui-ci souffre actuellement. Cela permettrait d'abandonner définitivement l'utilisation externe du logiciel *TopAero* et garantirait alors la réalisation complète de la chaîne photogrammétrique par le logiciel *Interface*. Il serait intéressant également de permettre la visualisation de l'évolution des coordonnées des points subissant la compensation afin de vérifier que l'algorithme a convergé correctement.

Gestion des données

Dans l'optique de la surveillance régulière d'ouvrages d'art, il est important de pouvoir conserver les résultats de géolocalisation obtenus à l'issue de chaque campagne de vol de manière très organisée. Il a été vu que l'onglet « Inspection » du logiciel permet d'ores et déjà, à partir des fichiers (« .txt ») issus de la restitution des désordres, de réaliser une première analyse des données ainsi qu'une comparaison de deux chantiers. Toutefois, cette partie mériterait d'être davantage développée en considérant par exemple la création d'un Système d'Information Géographique (SIG). Celui-ci permettrait, d'une part, de stocker les coordonnées ainsi que les attributs de chaque désordre observé dans une base de données et, d'autre part, d'effectuer des calculs ou autres requêtes sur ces données afin d'en extraire des informations pertinentes servant d'aide à la décision. Ceci est d'autant plus important que l'auscultation des ouvrages par le drone fait intervenir différents corps de métier et donc une exploitation des résultats différente. De plus, le SIG offre la possibilité de lier les données géographiques à une interface graphique ce qui rend la visualisation plus facile pour l'utilisateur.

Outre le logiciel bien connu *ArcGIS* qui est facile d'utilisation mais qui nécessite une licence, on peut également trouver des logiciels libres de SIG comme par exemple *PostGIS*. *PostGIS* a été développé par *Refractions Research Inc*. et est un module d'extension de PostGreSQL. Il permet notamment le stockage d'objets comme le point, la ligne, le polygone, le multipoint, la multiligne ou encore le multipolygone et utilise le langage SQL pour la réalisation des requêtes.

Liste des figures

Figure 1: Ruisseau sous autoroute....4
Figure 2: Ouvrage métallique....4
Figure 3: Inspection de l'ouvrage à l'aide d'une plate-forme....4
Figure 4: Mesure d'une fissure....5
Figure 5: Procès-verbal....5
Figure 6: Tableau de synthèse....5
Figure 7: Drone d'hélicoptère du LCPC....7
Figure 8: Equipements du drone....7
Figure 9: Onglets du logiciel Interface....8
Figure 10: Graphe d'image....9
Figure 11: Volume image....10
Figure 12: Points d'intérêt détectés par SIFT....11
Figure 13: Détection d'erreurs d'appariement dans les points de liaison....11
Figure 14: Chaîne photogrammétrique....12
Figure 15: Photogrammétrie aérienne....13
Figure 16: Cas normal....13
Figure 17: Bandes verticales....14
Figure 18: Bandes horizontales....14
Figure 19: Schéma d'une prise de vue....14
Figure 20: Schéma général des différents repères utilisés....15
Figure 21: Angles d'Euler mesurés par la centrale inertielle du drone....16
Figure 22: Sélection cible....19
Figure 23: Histogramme de l'imagette....19
Figure 24: Cible binarisée....19
Figure 25: Décodage de la cible....21
Figure 26: Reconnaissance automatique de cibles en angle incliné....22
Figure 27: Problèmes liés à l'interpolation....23
Figure 28: Définition d'un désordre....24
Figure 29: Méthode de redressement d'image pour la monorestitution....25
Figure 30: Onglet Inspection....26
Figure 31: Lieu du site de tests....30
Figure 32: Répartition des points d'appui et plaque de tests sur le mur Sud....31
Figure 33: Répartition des points d'appui sur le mur Est....31
Figure 34: Plaque de tests avec des désordres représentatifs....32
Figure 35: désordres présents sur les murs du site de tests....32
Figure 36: Vue aérienne du site de tests....33
Figure 37: Exemple de flou rencontré sur le pont de Tonnay Charente....34
Figure 38: Vue aérienne du site de tests....35
Figure 39: Plan topographique du site de tests élargi....35
Figure 40: Trajectoires suivies par le drone lors des deux vols....36
Figure 41: Plan de vol sur le site de tests....38
Figure 42: Pupitre de commande du drone....38
Figure 43: Drone en vol sur le site de tests....39
Figure 44: Tachéomètre....39
Figure 45: Réflecteur....39
Figure 46: Mosaïque des images du site de tests....41
Figure 47: Illustration de la compensation réalisée sous TopAero....42
Figure 48: Restitution photogrammétrique des désordres du panneau de tests....43

Figure 49: Traits verticaux observés à partir du drone....44
Figure 50: Erreurs de positions des prises de vues....46
Figure 51: Justesse et fidélité....48
Figure 52: Sommet inférieur gauche du triangle....49
Figure 53: Courbe de Gauss de la coordonnée X issue de la restitution et du tachéomètre....49
Figure 54: Points utilisés pour la mesure du biais....50
Figure 55: Mise à l'échelle du modèle (Photomodeler)....52
Figure 56: Points de Von Grüber....55
Figure 57: Carte IGN de la zone de l'éboulement....66
Figure 58: Photo de l'éboulement sur la RN134....66
Figure 59: Périmètre de la zone à lever....67
Figure 60: Schéma des prises de vues du drone....67
Figure 61: Répartition des points d'appui sur le bloc d'images....68
Figure 62: Carte du ciel montrant la présence des satellites....70
Figure 63: Zones utilisables pour les pistes de décollage du drone....70
Figure 64: Illustration de la compensation par faisceaux....73
Figure 65: Netteté automatique....76
Figure 66: Netteté désactivée....76
Figure 67: Sensibilité ISO 50....77
Figure 68: Sensibilité ISO 100....77
Figure 69: Sensibilité ISO 200....77
Figure 70: Sensibilité ISO 400....77

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison des mesures automatiques et manuelles des cibles.....21
Tableau 2: Coordonnées WGS84 des clous.....33
Tableau 3: Coordonnées locales des clous.....33
Tableau 4: Coordonnées WGS84 des points de calage.....38
Tableau 5: Coordonnées locales des points d'appui.....40
Tableau 6: Estimation de l'erreur commise pour chaque trait.....45
Tableau 7: Positions des centre de prises de vues avant et après compensation.....45
Tableau 8: Comparaison des coordonnées obtenues par restitution et par levé topographique.....46
Tableau 9: Moyenne et écart-type de référence.....48
Tableau 10: Moyenne et écart-type du point sélectionné.....49
Tableau 11: Série de mesures du biais observé.....50
Tableau 12: Moyenne et écart-type du biais observé.....50
Tableau 13: Coordonnées restituées de la cible 7 par plusieurs couples stéréoscopiques.....51
Tableau 14: Précision finale des coordonnées.....51
Tableau 15: Comparaison des mesures de distance.....51
Tableau 16: Évaluation de la qualité des coordonnées fournies par Photomodeler.....53

Liste des équations

Equation 1: Moment bi-dimensionnel de Hu....20
Equation 2: Coordonnées du centre de l'ellipse....20
Equation 3: Demi-grand axe de l'ellipse....20
Equation 4: Demi-petit axe de l'ellipse....20
Equation 5: Angle définissant l'orientation de l'ellipse....20
Equation 6: Coordonnées des pixels permettant le décodage de la cible....21
Equation 7: Équations du redressement d'image....23
Equation 8: Matrice de perspective....24
Equation 9: Erreur moyenne quadratique des inconnues....47
Equation 10: Valeur moyenne....49
Equation 11: Écart-type....49
Equation 12: Fonction densité de Gauss....50
Equation 13: Correction du biais sur les coordonnées finales....51
Equation 14: Erreur finale des coordonnées corrigées....51
Equation 15: Variance des coordonnées finales....51
Equation 16: Equations de colinéarité....73
Equation 17: Equations d'erreurs....74
Equation 18: Equations d'erreurs sous forme matricielle....74
Equation 19: Solution obtenue par les moindres carrés....74
Equation 20: Matrice des poids des observations sur les clichés....74
Equation 21: Matrice des poids des coordonnées-terrain des points d'appui....74
Equation 22: Solution obtenue par les moindres carrés avec pondération des observations....74
Equation 23: Valeur de l'inconnue compensée....75
Equation 24: Erreur moyenne quadratique des inconnues....75

Bibliographie

Rapport de Projet de Fin d'Etude :

Cannelle B. [2007], Géolocalisation des défauts d'ouvrages sur des images acquises par un drone d'hélicoptère, Rapport de PFE - Mastère Positionnement et Mesures de Déformations (PPMD), ENSG, LCPC Nantes.

Documents de formation :

Grussenmeyer, P. [2006-2007], Cours de photogrammétrie, INSA Strasbourg, Topographie.

Landes, T. [2006-2007], Cours de calculs d'erreurs, INSA Strasbourg, Topographie.

Wolf, P.R. & Dewitt, B.A. [2000], Elements of Photogrammetry with GIS Applications (3ème Ed.), Boston : The Mc Graw-Hill Companies, Etats-Unis, Chapitre 17 « Aerotriangulation ».

Publications du LCPC et des partenaires :

Derkx, F. et al [2002], Concept de PMI pour l'inspection d'ouvrages d'art, LCPC Paris et Nantes.

Derkx, F. & Sorin, JL. [2005], Présentation du drone et des premières instrumentations, LCPC Paris et Nantes.

Gautier, Y. [2008], Cahier des charges de l'intervention de la PMI en vallée d'Aspe, LRPC Bordeaux.

Lacoste, G. [2006], La méthode de gestion des ouvrages départementaux, SETRA.

Moliard, JM. [2006], Qualité des images réalisées avec l'appareil photo Nikon embarqué sur la nacelle du drone, LCPC Nantes.

Ouvrages et articles :

Garnier, P. [2007], Acceptabilité et expression des résultats expérimentaux, Biochimie, validé par l'inspection le 9 mai 2007.

Lau, K.L., Siu, W.C. et Law, N.F. [2002], Best-fit ellipse concept from second order moments for object retrieval, IEEE, International Conference on Information Technology and Applications, (ICITA2002), Bathurst, Australie, pages 167–75.

Muttenz, [2000], Guide d'assurance de la qualité : photogrammétrie et génération de MNT.

Tsai, R. Y. [1987], A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, IEEE, Journal of Robotics and Automation, RA-3(4):323--344, août 1987.

Zhang, Z. [1998], A flexible new technique for camera calibration, IEEE, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.

Annexes

Annexe 1: Architecture du projet PMI.....63

Annexe 2: Fiche technique de l'appareil photo Nikon Coolpix 8700.....64

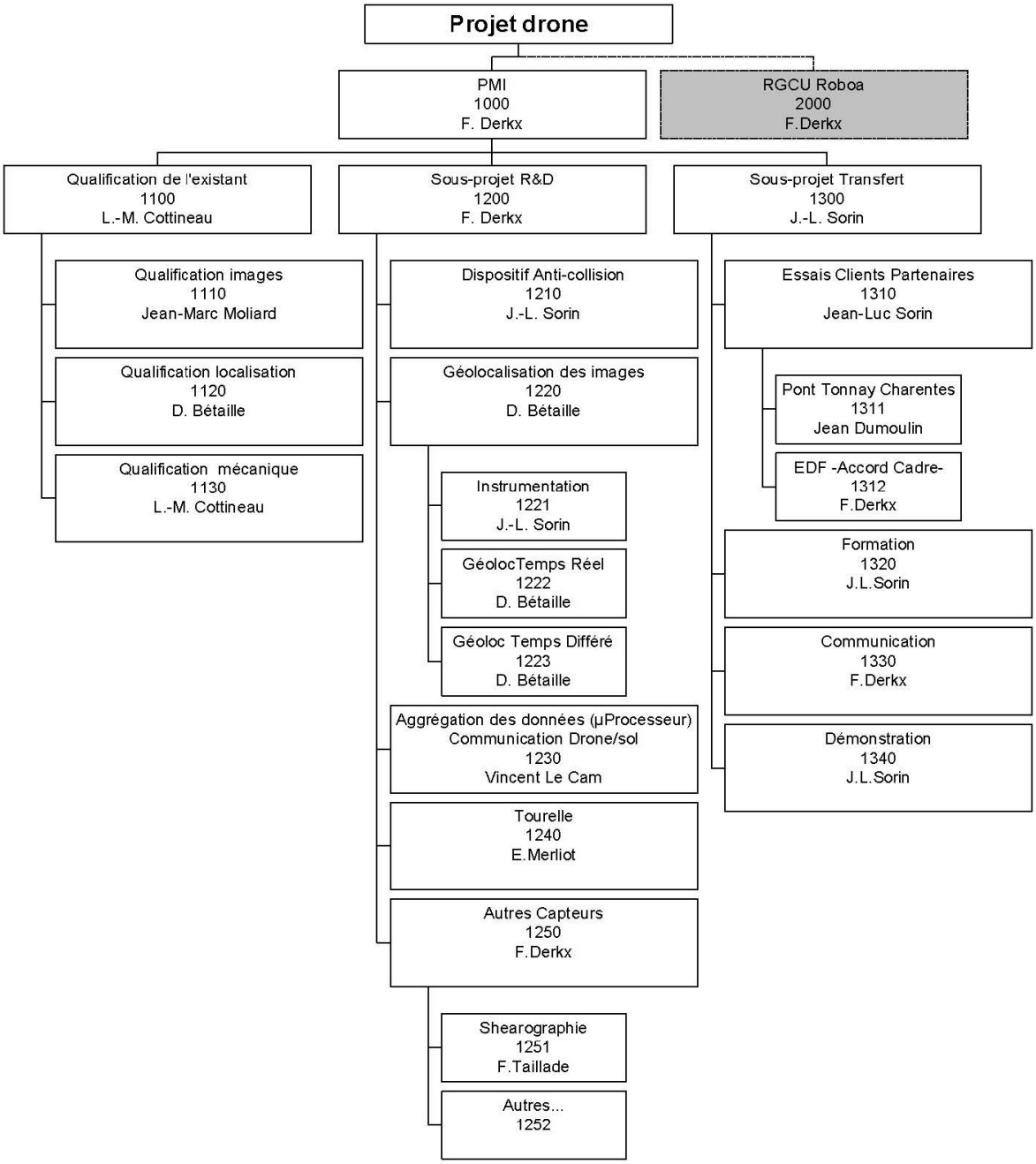
Annexe 3: Caractéristiques du tachéomètre SOKKIA Net2.....65

Annexe 4: Expérimentation dans la Vallée d'Aspe.....66

Annexe 5: Méthode de compensation par faisceaux.....73

Annexe 6: Réglages de l'appareil photo Nikon.....76

Annexe 1 : Architecture du projet PMI



Annexe 2 : Fiche technique de l'appareil photo Nikon Coolpix 8700

Type	
Type :	Compact Numérique
Résolution	
Megapixels :	8.0 megapixels
Résolution maximum :	3264x2448 pixels
Résolution photo :	2592x1944, 2048x1536, 1600x1200, 1280x960, 1024x768, 640x480 pixels
Capteur	
Capteur :	CCD
Taille du capteur :	2/3 inch
Filtres couleurs :	RGB
Nombre de pixels total :	8.3 megapixels
Zoom	
Zoom optique :	8.0 x
Longueur focale (correspondance 35mm) :	35-280
Zoom numérique :	4.0 x
Zoom total :	32.0 x
Ouverture :	F4.2-F7.4
Mise au point automatique :	Oui
Mise au point manuelle :	Oui
Distance (normale-macro) :	50-3
Pas-de-vis pour filtre :	Non
Obturateur :	8-1/4000 secondes
Autre	
Sensibilité (ISO equiv.) :	50/100/200/400
Flash	
Flash intégré :	Oui
Flash externe :	Oui
Modes de flash intégré :	Auto, Fill-in, Anti-red-eye, Slow, Off
Moniteur LCD	
Écran couleur :	Oui
Taille d'écran LCD :	1.8 pouces
Résolution de l'écran LCD :	134000 pixels
Vidéo	
Enregistrement vidéo :	Oui
Enregistrement vidéo :	640x480
Formats de fichiers	
Format de fichier :	JPEG (EXIF v. 2.2)

Annexe 3 : Caractéristiques du tachéomètre SOKKIA Net2

NET2100 Specifications		
Telescope		
Length		175mm
Objective aperture		45mm(1.8 in.) (EDM: 49mm(1.9 in.))
Magnification		30x
Resolving power		3"
Field of view		1° 30' (26m/1000m)
Minimum focus		2m(6.6 ft.)
Reticle illumination		Built-in (bright/dim selectable)
Fine/coarse 2-speed focus selection		Standard
Angle measurement		
Type	H&V	Photoelectric incremental rotary encoder scanning. Both circles adopt diametrical detection and are provided with absolute 0 index point.
Minimum resolution(selectable)	H&V	0.5"/0.1mgon/0.002mil 1"/0.2mgon/0.005mil
Accuracy	H&V	2"(0.6mgon) (standard deviation according to DIN 18723)
Automatic dual-axis level compensator		Dual-axis liquid electro-optical tilt sensor, ON/OFF selectable, Range: ±3', Minimum resolution according to selected minimum resolution of angle measurement, Out-of range warning message
Display mode	H V	Clockwise/counterclockwise selectable Zenith 0° /horizontal 0° selectable
Distance measurement		
Light source		Modulated Near-infrared light-emitting diode
Measuring range		2m(6.6ft) to 100m(328ft) (RS90 reflective sheets target) 50m(164ft) to 1000m(3,280ft) (using CPS12 high-precision reflective prism)
Minimum resolution	Fine measurement High-speed measurement Tracking	0.0001m/0.001m(0.001ft/0.01ft) selectable 0.001m(0.01ft) 0.01m(0.1ft)
Accuracy		±(0.8 + 1ppm x D)mm*1 (using RS or RT series reflective targets) ±(2.0 + 2ppm x D)mm*2 (using CPS12 high-precision reflective prism)
Measuring time:	Fine measurement High-speed measurement	Every 4.7s (initial meas. 6.5s) Every 3.3s (initial meas. 5.0s)
Display range		0.0001 to 1599.9999m(5249.3332ft)
Atmospheric correction		Selectable: (1)Direct key-in of temperature and pressure (hPa/mmHg) (2)Direct key-in of temperature, pressure (hPa/mmHg) and humidity (3)Direct key-in of ppm (4)No correction
General		
Display		Alphanumerics, graphics Dot matrix LCD on each face 20 chars. x 6 lines, 120 x 64 dots, Non-reflective glass, backlight
Keyboard		26 Latex keys on each face (numeric, cursor, edit, power, softkey function, illumination)
Sensitivity of levels	Plate level Circular level	20"/2mm 10'/2mm
Optical plummet		Image: erect. Magnification: 7x. Minimum focus: 0.5m
Standing (vertical) axis		Independent double-axis
Battery level display		4-stage power codes, with message display
Automatic power cut-off		30 minutes after last operation, ON/OFF selectable
Data storage	Internal memory capacity	448KB (Approx 3,000 points)
Interface		Asynchronous serial, RS-232C compatible, Centronics compatible
Operating temperature		-10°C to +40°C (14°F to 104°F)
Water resistance		IPX2 (Based on IEC 529/1989)
Size with handle and BDC35 battery		177(W) x 165(D) x 371(H) mm (7.0(H) x6.5(D) x 14.6(H) in.)
Instrument height (horizontal axis height)		236mm (9.3 in.) from tribrach bottom, 193mm (7.6 in.) from tribrach dish
Weight		6.1kg (13.4lb.) (including handle and battery)
Power supplies		
Voltage		6V DC
BDC35 internal battery		Rechargeable Ni-MH battery, 2 Pcs. supplied
Continuous use at 25°C (77°F)		2 hrs (approx)
Charging time at 25°C (77°F)		70 min (approx) BDC12 external battery (optional)
BDC12 external battery (optional)		
Continuous use at 25°C (77°F)		8 hrs (approx)

Annexe 4 : Expérimentation dans la Vallée d'Aspe

Partie A: DEFINITION DU PROJET

1) S'informer sur la localisation et le type d'ouvrage à observer

La vallée d'Aspe se trouve dans le massif des Pyrénées au Sud de la ville de Pau. Elle est traversée par la route nationale RN134 qui mène en Espagne et est traversée par de nombreux poids lourds.
Du fait de l'éboulement d'une partie de la paroi rocheuse sur la RN134, il a été demandé d'observer à l'aide du drone une zone d'environ 1300 m de long et sur toute la hauteur de la falaise, de part et d'autre de l'éboulement.

2) Récupérer toute information topographique (plan, coordonnées, photos...)

Coordonnées approximatives de l'éboulement :

42°55' Nord et 0°34' Ouest et h=620m.

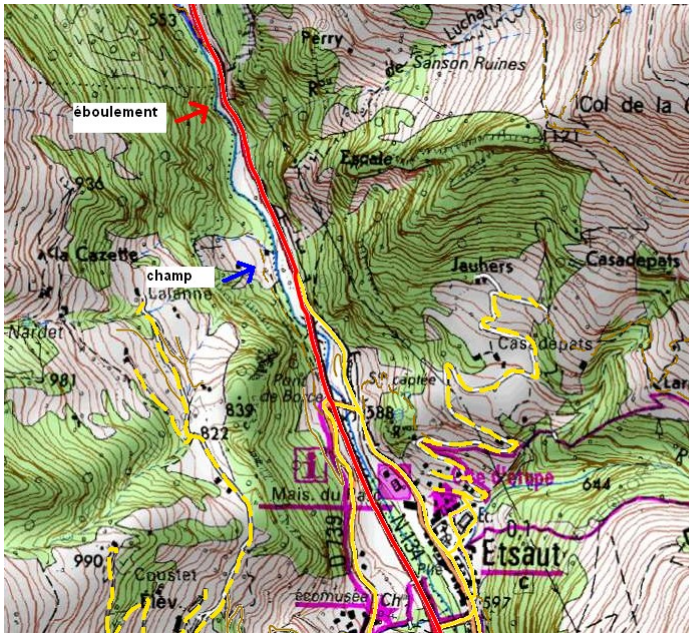


Figure 57: Carte IGN de la zone de l'éboulement

Figure 58: Photo de l'éboulement sur la RN134

Coordonnées de 9 points GPS mesurés le long de la RN134 :

points	X Lambert 2 étendu	Y Lambert 2 étendu	Z (m)	Nbr de satellites	
p1	362827.15	1768721.69	713,9	5	(03,16,18,21,22)
p2	362845.83	1768703.13	713,8	4	(03,16,18,22)
p3	362738.59	1768808.99	713,8	5	(03,16,18,21,22)
p4	361763.16	1772616.87	584,5	5	(03,16,18,21,22)
p5	361700.38	1772701.19	578,6	4	(03,16,18,22)
p6	361636.45	1772847.84	583,4	4	(03,16,18,22)
p7	361325.97	1774038.54	550,5	5	(03,11,19,22,28)
p8	358960.96	1776038.09	485,2	4	(01,03,11,19)
p9	359900.07	1789667.26	321,6	4	(01,03,11,19)

Seuls les points 4, 5, 6 et 7 sont dans notre périmètre d'intervention.

3) Définir les attentes du client et la précision exigée

Le maître d'ouvrage pour ce projet était la Direction Interdépartementale des Routes (DIR) de Pau.

Référence : OR11N063_cdcRN134
Affaire suivie par : Yves GAUTIER (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux)
Objet : OR 11N063 – cahier des charges RN134

- Besoin de photographies permettant ultérieurement l'observation stéréoscopique de la zone autour de l'éboulement
- Géolocalisation sur la zone restreinte de l'éboulement pour tester l'efficacité de la méthode
- Pas de grande précision exigée pour la géolocalisation et échelle des images d'environ 1/3000
- Intérêt pour dimensionner les blocs rocheux et calculer la pente des versants

Partie B: PLANIFICATION BUREAU

4) Déterminer le périmètre d'action et les zones de l'ouvrage à lever

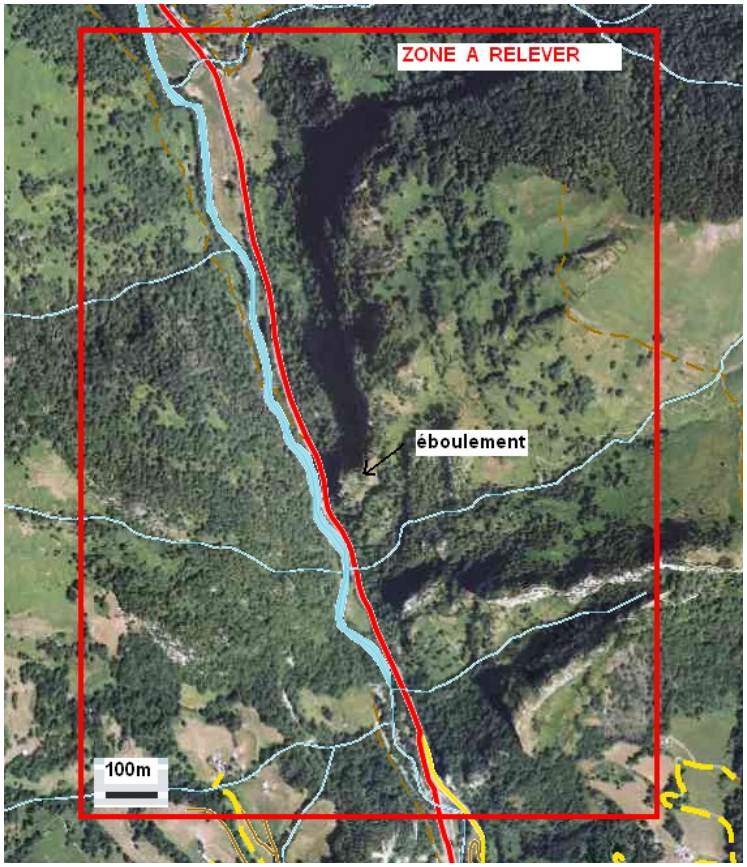


Figure 59: Périmètre de la zone à lever

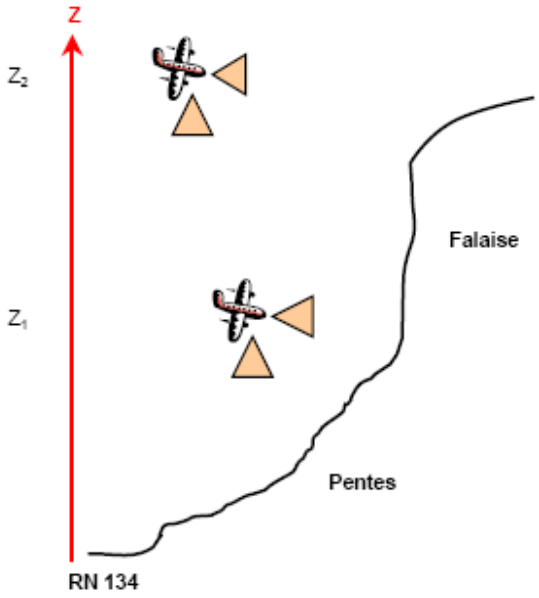


Figure 60: Schéma des prises de vues du drone

Pour le relevé de la paroi rocheuse, le drone devra effectuer des prises de vues face à la falaise mais également certaines à la verticale de façon à couvrir au mieux la paroi.

5) Calculer les paramètres du levé photogrammétrique.

L'appareil photo Nikon Coolpix 8700 embarqué sur le drone a les caractéristiques suivantes :
- Résolution maximale : 640x480 pixels à 3264x2448 pixels.
- Taille de capteur : 2/3 inch, ce qui correspond à une CCD de (LxH) = 8,8x6,6mm.
- Focale c : 8,9 à 71,2mm.

Considérant que l'on opte pour la meilleure résolution et la plus petite focale (8,9 mm), à une distance **D=30m** de l'ouvrage, il en résulte que chaque photo couvrira une surface terrain de 29,6 x 22,2 m.

X = L*D/f = 8,8 *30000/8,9 = 29,6 m
Y = H*D/f = 6,6*30000/8,9 = 22,2 m
Cela permettra d'obtenir des images à une échelle de 1/3370.

Pour une zone à lever de dimension environ 1000x100m, on calcule le nombre de photos du chantier par :

- Nombre de photos par bande :

n = entierSup[1000 / (29,6m * (1-60%)) + 1] = 86 photos

- Nombre de bandes par bloc :

m = entierSup[100 / (22,2m * (1-20%))] = 6 bandes

Il en résulte un nombre de photos total de 86x6 = **516 photos**.

Pour aider la navigation du drone dans la prise des clichés, on calcule la distance de base que le drone devra parcourir entre 2 prises de vues.
Pour un déplacement horizontal, la base sera égale à : Bh = (1-60%) * 29,6m = 11,8 m
Pour un déplacement vertical entre bandes, on décalera de : Bv = (1-20%)*22,2m = 17,8 m

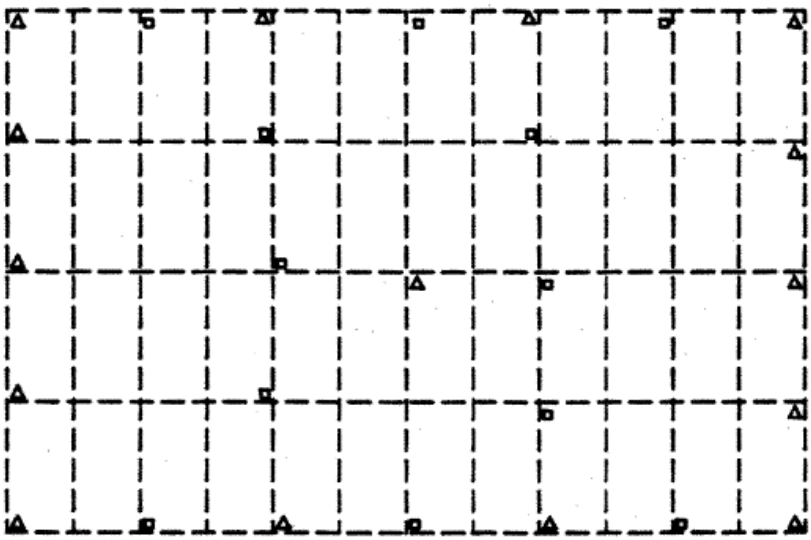


Figure 61: Répartition des points d'appui sur le bloc d'images

Pour les points d'appui, on veillera à positionner un minimum de deux points au début et à la fin de chaque bande, puis on en positionnera également deux tous les 4 à 5 stéréomodèles afin de garantir une bonne précision.
Pour le cas demandé de la vallée d'Aspe, la zone qui sera géolocalisée a été réduite à 100 mètres de part et d'autre de l'éboulement. Le nombre de photos est ainsi réduit à 60 et le nombre de points d'appui nécessaires peut donc être estimé à 21 points.

6) Planifier l'emplacement des points GPS et de la polygonale

La polygonale :

Des clous ou piquets devront être mis en place aux endroits stratégiques permettant une bonne visibilité de la paroi pour le levé des points d'appuis.

On veillera à ce que chaque point de la polygonale voit le point précédent et le suivant pour garantir une chaîne liée et que l'ensemble soit raccroché au début et à la fin sur au moins un point GPS pour le passage d'un système de coordonnées à l'autre.

Les points GPS :

- Pour la polygonale :

Comme expliqué précédemment, il faut quelques points GPS, de préférence sur les points initiaux et finaux de la polygonale pour l'encadrer et la rattacher au référentiel WGS84.

Il est intéressant de lever les sommets de la polygonale également pour contrôle et éventuellement compensation des coordonnées et paramètres de transformation.

- Pour le drone :

Des points GPS devront être pris aux endroits potentiels de décollage du drone. Ceux-ci permettront au drone de revenir sur ces points en cas de perte de contrôle du drone ou tout simplement, pour la programmation du décollage et atterrissage.

- Pour le plan de vol :

Un minimum de 4 points GPS bien répartis sur le site d'intervention sont recommandés pour réaliser une cartographie succincte des lieux afin de constituer le plan de vol du drone. Lors de la reconnaissance terrain, il sera intéressant de lever au GPS des éléments caractéristiques du terrain qui permettront par la suite de géoréférencer une image aérienne et compléter ainsi la carte du plan de vol.

7) Penser à une nomenclature pour les différents points

Pour ce qui est de la géolocalisation, la nomenclature pourra être la suivante :
- de 800 à 899 pour le nom des stations implantés au sol.
- de 100 à 199 pour les points d'appuis se trouvant sur la bande 1.
- de 200 à 299 pour les points d'appuis se trouvant sur la bande 2.
- et ainsi de suite...

8) Prévoir une date d'intervention pour se rendre sur les lieux

Date prévue pour le mardi 4 mars 2008.
Intervenants :
- André Moutengou (DIR Pau)
- Nicolas Flouest (LR Bordeaux)
- François Derkx (LCPC Paris)
- Jean-luc Sorin (LCPC Nantes)
- Noémie Vanetti (LCPC Nantes)

9) Évaluer la disponibilité satellitaire et les masques possibles pour le GPS

En observant les données fournies par la DIR, on remarque que les points GPS ont été mesurés avec seulement 4 ou 5 satellites ce qui montre une certaine difficulté à ce sujet.

Ceci s'explique par les obstacles que représentent les deux flancs de montagnes de part et d'autre de la route (Est et Ouest).

Ceux-ci ont été représentés sur la carte du ciel pour estimer de manière un peu plus précise les satellites réellement disponibles sur le site.

Les angles d'élévation choisis sont 33° à l'ouest et 45° à l'est (estimé depuis Google Earth).

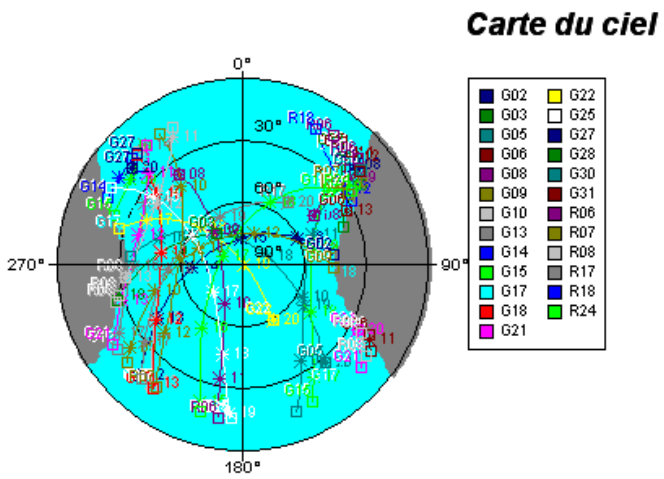


Figure 62: Carte du ciel montrant la présence des satellites

Partie C: RECONNAISSANCE TERRAIN

10) Se rendre sur le terrain pour évaluer les disponibilités et les contraintes du lieu

Lors de notre reconnaissance sur place, on a pu observer la pauvreté satellitaire dans certaines zones, notamment la route et les zones se trouvant en contre-bas près de la rivière. Les champs dégagés se trouvant côté ouest et ayant une certaine altitude avaient davantage de chance à recevoir un signal.

Nous avons pu également repérer les divers sentiers et pistes praticables pour atteindre les zones potentielles de décollage du drone.

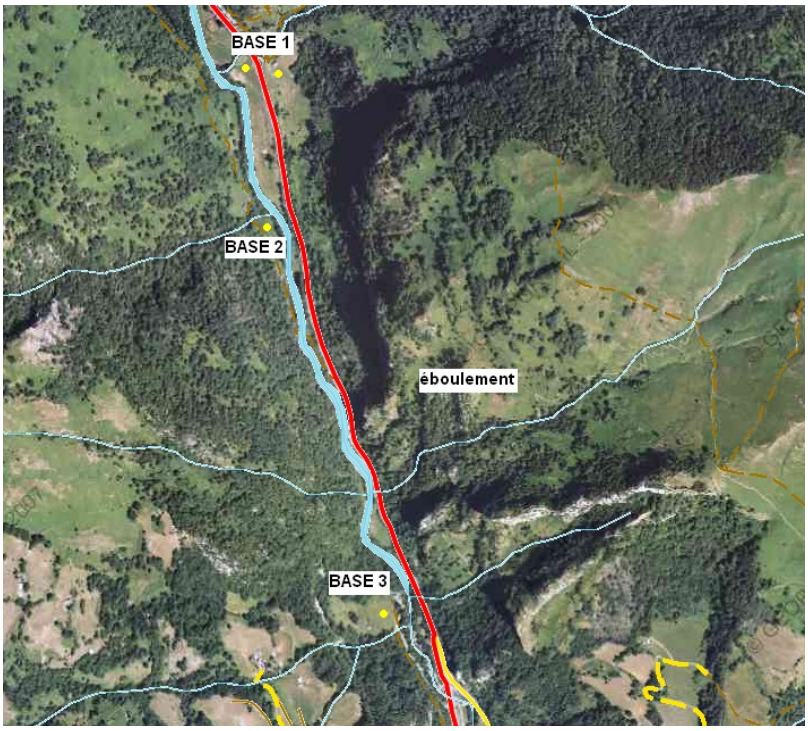


Figure 63: Zones utilisables pour les pistes de décollage du drone

On a, de plus, pu observer la présence de nombreux fils électriques à hauteur variable qui constituera une contrainte pour la navigation du drone.

11) Réaliser un plan de vol pour le drone

Il a été relevé plusieurs points GPS afin de permettre le géoréférencement de la photo aérienne du site qui nous servira de base pour le plan de vol du drone.

12) Implanter les points pour les stations et mesurer les points GPS

Compte tenu des problèmes de GPS et des mauvaises conditions météo, on a juste implanté 2 clous de géomètre en bordure de la route permettant l'observation des parois se trouvant au niveau de l'éboulement. Il n'a pas pu être réalisé de polygonale.

Partie D: PRE-TRAITEMENTS

13) Calculer les coordonnées des points levés

Pour le calcul des coordonnées, nous avons utilisé la station RGP de Pau (Référence: UNME Pau – TERIA) qui se trouve à 48km de notre chantier et dont les coordonnées dans le système RGF93 sont:

Latitude: 43° 19' 17,77732" N
Longitude: 00° 19' 32,33445" O
Hauteur: 278.733 m

Par le logiciel GNSS Solution, on a donc calculé dans un premier temps les coordonnées de l'antenne de base fixe:

N° Point	longitude	latitude
03041046	0° 34' 54.03819"W	42° 55' 46.03564"N

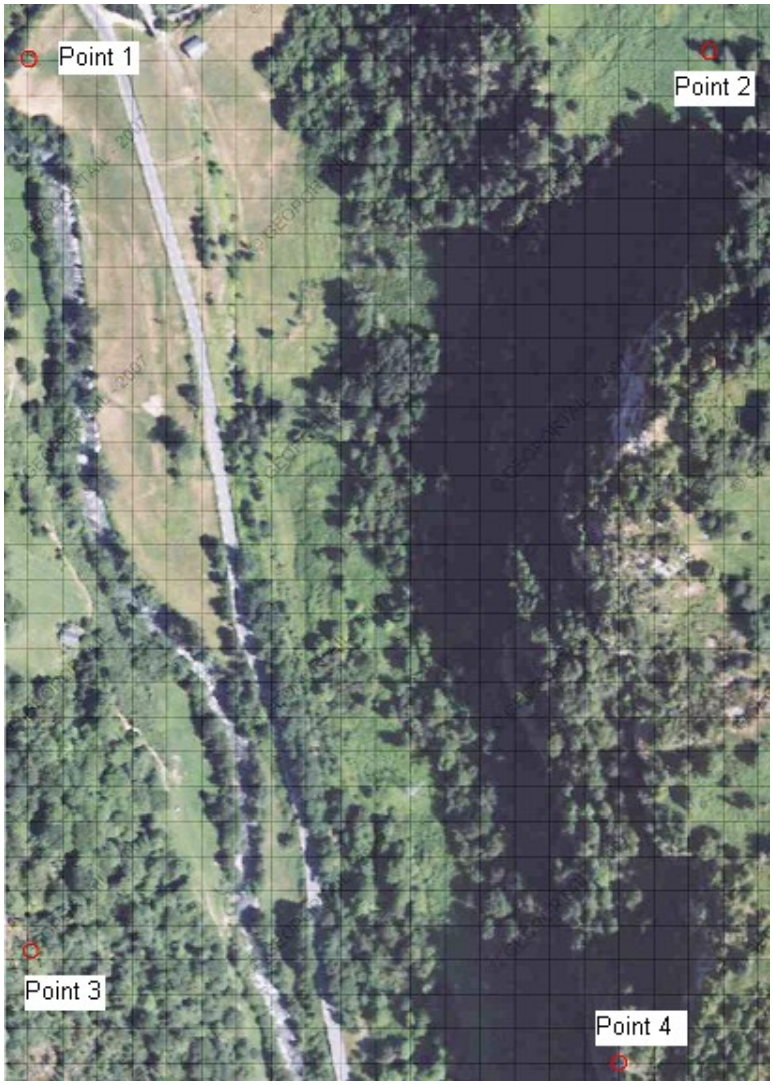
On a ensuite fixé ces coordonnées pour prendre notre antenne de base comme point de référence et pour calculer les points levés le matin avec l'antenne mobile.

N° Point	longitude	latitude	Etat
03041144	0° 34' 39.46737"W	42° 55' 14.53649"N	Estimé
03041125	0° 34' 50.28000"W	42° 55' 34.16890"N	Calculé

L'après-midi, nous n'avons pas remis en place l'antenne de base et les coordonnées des points ont donc une précision bien inférieure. Elles ont été calculées directement avec la station RGP de Pau.

N° Point	longitude	latitude
1	0° 34' 39.580"W	42° 55' 07.326"N
2	0° 34' 40.520"W	42° 55' 07.900"N
3	0° 34' 38.975"W	42° 55' 08.415"N
4	0° 34' 37.960"W	42° 55' 07.505"N
5	0° 34' 39.675"W	42° 55' 06.242"N

14) Constituer le plan de vol du drone à partir des informations recueillies



Le plan de vol est une image aérienne récupérée sur le Géoportail de l'IGN et convertie au format « .bmp ».

Connaissant l'échelle de l'image (1/2000), on a superposé une grille avec un pas de 1cm, soit 20m terrain, qui servira à guider le drone lorsqu'il est en vol et à compléter les mesures du télémètres pour estimer les distances entre le drone et la paroi.

Quatre points connus en coordonnées WGS84 et marqués sur la carte par un cercle rouge servent de points de calage pour géoréférencer le plan de vol.

Partie E: INTERVENTION TERRAIN

Partie F: TRAITEMENTS AU BUREAU

Du fait de problèmes météorologiques puis de divers problèmes techniques, seules les étapes A à D ont pu être réalisées et l'intervention terrain est reportée à une date ultérieure.

Annexe 5 : Méthode de compensation par faisceaux

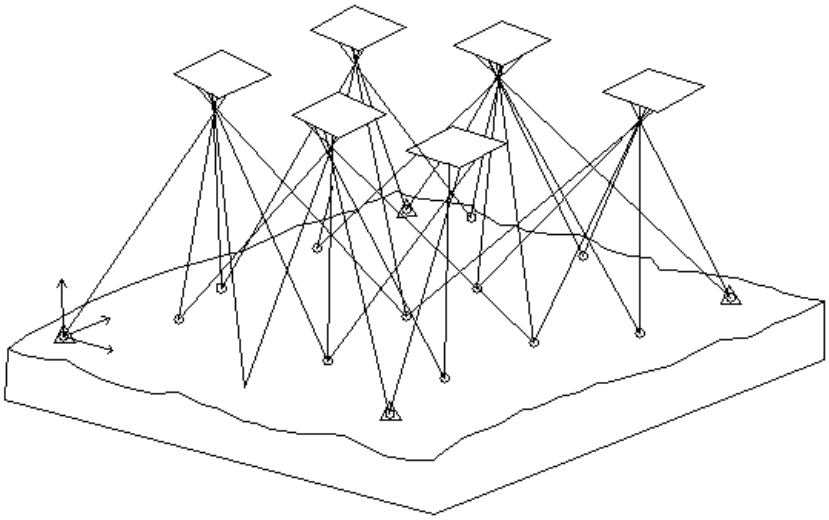


Figure 64: Illustration de la compensation par faisceaux

Mathématiquement, les relations liant les coordonnées-photo (e, n) d'un point P à ses coordonnées-objets (X, Y, Z) s'écrivent de la manière suivante, elles sont communément appelées «équations de colinéarité» parce que le point de vue O, le point-image P' et le point-objet P sont situées sur une même droite (rayon perspectif) :

$$(16)\quad \begin{aligned} e &= e_0 - c*\left(\frac{(r11*(X-X_0)+r21*(Y-Y_0)+r31*(Z-Z_0))}{(r13*(X-X_0)+r23*(Y-Y_0)+r33*(Z-Z_0))}\right) \\ n &= n_0 - c*\left(\frac{(r12*(X-X_0)+r22*(Y-Y_0)+r32*(Z-Z_0))}{(r13*(X-X_0)+r23*(Y-Y_0)+r33*(Z-Z_0))}\right) \end{aligned}$$

Les paramètres r_{ij} sont les éléments de la matrice de rotation R définissant l'orientation de la photographie dans l'espace par rapport au système de coordonnées (X, Y, Z) du repère local.

Pour ce calcul de compensation, les données initiales sont les coordonnées-images (e, n) des points de liaison qui ont été obtenues automatiquement grâce au détecteur SIFT ainsi que les coordonnées-images (e, n) et les coordonnées-terrain (X, Y, Z) des points d'appui qui ont été obtenues, dans le cas de cibles codées, par le biais de la détection automatique de cibles. Sont également connues les coordonnées du point principal (e_0, n_0) et la valeur de la focale c grâce au calcul préalable de l'orientation interne.

Les inconnues à déterminer sont donc les positions (X_0, Y_0, Z_0,) et attitudes (ω, φ, κ) des centres de prises de vues ainsi que les coordonnées-terrain (X, Y, Z) des points de liaison.

On pose pour chaque inconnue : $X = X^0 + dX$ où X^0 est une valeur approchée de l'inconnue et dX l'appoint de l'inconnue

A partir des équations de colinéarité, on procède à une linéarisation grâce à un développement en série du premier degré, selon la formule de Taylor, des fonctions e et n au voisinage des valeurs approchées des inconnues. On calcul ainsi les résidus v pour chaque observation et on obtient les équations

d'erreurs pour chaque point-image i d'un cliché j données par (17) :

$$v_{eij}=(\frac{de}{dX_{0j}})^0 dX_{0j}+(\frac{de}{dY_{0j}})^0 dY_{0j}+(\frac{de}{dZ_{0j}})^0 dZ_{0j}+(\frac{de}{d\omega_{0j}})^0 d\omega_{0j}+(\frac{de}{d\varphi_{0j}})^0 d\varphi_{0j}+(\frac{de}{d\chi_{0j}})^0 d\chi_{0j}$$
$$+(\frac{de}{dX_i})^0 dX_i+(\frac{de}{dY_i})^0 dY_i+(\frac{de}{dZ_i})^0 dZ_i-(e_{ij}-e_{ij}^0)$$

$$v_{nij}=(\frac{dn}{dX_{0j}})^0 dX_{0j}+(\frac{dn}{dY_{0j}})^0 dY_{0j}+(\frac{dn}{dZ_{0j}})^0 dZ_{0j}+(\frac{dn}{d\omega_{0j}})^0 d\omega_{0j}+(\frac{dn}{d\varphi_{0j}})^0 d\varphi_{0j}+(\frac{dn}{d\chi_{0j}})^0 d\chi_{0j}$$
$$+(\frac{dn}{dX_i})^0 dX_i+(\frac{dn}{dY_i})^0 dY_i+(\frac{dn}{dZ_i})^0 dZ_i-(n_{ij}-n_{ij}^0)$$

Ces équations peuvent s'écrire sous forme matricielle par :

(18) $v=A.dX-B$ où A est la matrice des dérivées partielles
B est la matrice du second membre
dX est la matrice des inconnues

On procède alors à une résolution au sens des moindres carrés du système matriciel ce qui permet d'obtenir une solution donnée par :

(19) $dX=({}^tA\,A)^{-1}({}^tA\,B)$

Afin d'améliorer la justesse des résultats obtenus pour les paramètres, il peut être intéressant d'intégrer un système de pondération qui prendra en compte la précision des différentes observations intervenants dans les calculs (Wolf&Dewitt [2000]). Si l'on écarte les observations de position et d'orientation fournies par le drone du fait de leurs imprécisions trop élevées, il rentre alors en jeu les observations relatives à la mesure des coordonnées-image puis celles relatives au levé des points d'appui sur le terrain.

Pour le premier groupe d'observations considéré, on choisit arbitrairement l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids σ_0 égal à 1, ce qui permet de simplifier la matrice des poids pour un point i d'une photo j par :

(20) $P_{ij}=\begin{bmatrix}\frac{1}{\sigma^2_{xij}} & 0\\ 0 & \frac{1}{\sigma^2_{yij}}\end{bmatrix}$ où σ^2_{xij} et σ^2_{yij} sont les variances relatives à la mesure en x et y sur l'image

Pour le second groupe d'observations, la matrice des poids pour chaque point d'appui j utilisé pourra prendre la forme suivante :

(21) $P_j=\sigma^2_0\begin{bmatrix}\sigma^2_{Xj} & \sigma_{XjYj} & \sigma_{XjZj}\\ \sigma_{YjXj} & \sigma^2_{Yj} & \sigma_{YjZj}\\ \sigma_{ZjXj} & \sigma_{ZjYj} & \sigma^2_{Zj}\end{bmatrix}^{-1}$ avec $\sigma_{XjYj}=\sigma_{YjXj}$, $\sigma_{XjZj}=\sigma_{ZjXj}$, $\sigma_{YjZj}=\sigma_{ZjYj}$

où σ^2_0 est la variance propre à l'unité de poids (elle peut être fixée égale à 1)
σ^2_{Xj} , σ^2_{Yj} , σ^2_{Zj} sont les variances relatives à chaque composante X, Y et Z d'un point d'appui
σ_{XjYj} , σ_{XjZj} , σ_{YjZj} sont les covariances

En regroupant ces sous-matrices, on forme une matrice globale des poids appelée P. La résolution par les moindres carrés du système matriciel donne finalement pour solution aux appoints des inconnues :

(22) $dX=({}^tA\,P\,A)^{-1}({}^tA\,P\,B)$

Plusieurs itérations sont alors nécessaires pour obtenir la convergence du calcul. Celui-ci est arrêté lorsque la variation des résidus $v = A.dX - B$ devient négligeable d'une itération à l'autre.

Les inconnues sont finalement obtenues par:

(23) $X = X_0 + dX$

et les erreurs moyennes quadratiques par:

(24) $mq_X = mq_0 \sqrt{Q_{XX}}$

où mq_0 est l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids
Q_{XX} est le cofacteur situé sur la diagonale de la matrice $({}^tA\ A)^{-1}$

Annexe 6 : Réglages de l'appareil photo Nikon Coolpix 8700

Netteté :

En mode de netteté automatique (cf. figure 41), l'appareil traite automatiquement les images pour accentuer les limites entre les zones claires et sombres de l'image afin d'en accentuer ses contours. En analysant de près les pixels, on voit un effet de renforcement du noir et du blanc aux contours entre la cible et le fond ce qui crée une sorte d'auréole autour des formes:

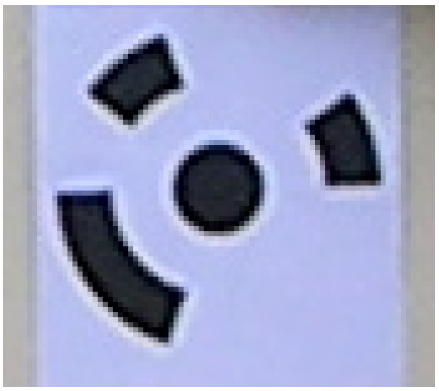


Figure 65: Netteté automatique

Figure 66: Netteté désactivée

On préférera donc choisir l'option netteté désactivée (figure 42) pour limiter au maximum les traitements réalisés par l'appareil photo après la prise de vue.

Balance des blancs :

La couleur de la lumière réfléchie par un objet dépend de la couleur de la source lumineuse. Un objet qui sera à l'ombre ne renverra pas la même lumière que le même objet placé au soleil. Les appareils numériques simulent cette capacité d'adaptation en traitant les informations provenant du capteur image CCD en fonction de la couleur de la source lumineuse, c'est ce qui est appelé la « balance des blancs ». Cela consiste en un ajustement des trois canaux de couleurs (RVB) de façon à ce qu'un objet réel de couleur blanche soit également perçu en blanc sur l'image. On pourra laisser celle-ci en mode automatique pour un ajustement optimal en fonction des conditions d'éclairage.

Sensibilité :

Dans une prise de vue, le paramètre de la sensibilité est un élément important à prendre en compte. En effet, plus la sensibilité (ou gain) est élevée et moins la présence de lumière est nécessaire pour la prise de vue. Ainsi, il est possible d'opter pour des vitesses d'obturation plus rapides ou des ouvertures plus petites. Toutefois, une sensibilité élevée a tendance à augmenter le bruit ce qui se traduit par l'apparition de « grains » sur les images comme le montre les figures 68 à 71.

Les essais ont montré que le réglage ISO 50 est celui permettant le meilleur rendu car l'image est alors très peu bruitée. Avec cette sensibilité, reste toutefois le problème d'intensité quand la lumière est insuffisante. On pourra donc choisir de fixer la sensibilité en automatique sur le Nikon car celui-ci règle la sensibilité sur 50 par défaut et l'augmente jusqu'à 200 dans le cas où on manque de lumière. Pour compenser cette faible sensibilité, à une même vitesse d'obturation donnée, il faudra donc augmenter l'ouverture. Il faudra aussi vérifier que cela ne diminue pas de manière trop importante la profondeur de champ pour ne pas estomper les détails de l'arrière plan.

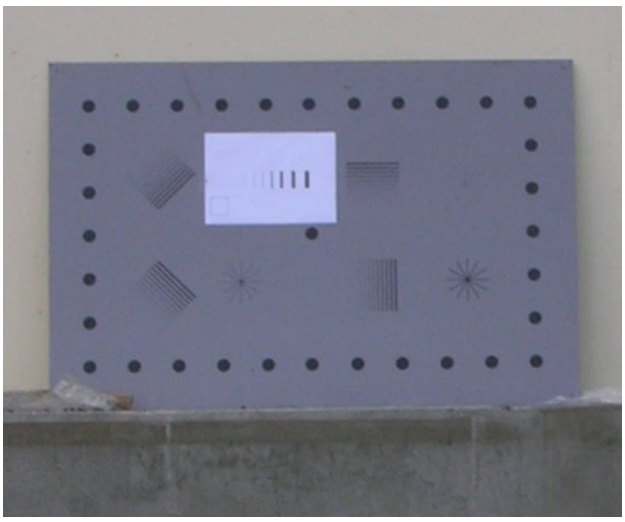


Figure 67: Sensibilité ISO 50

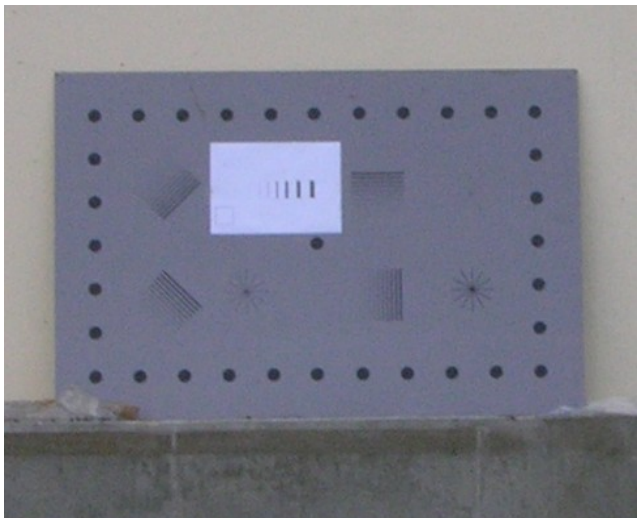


Figure 68: Sensibilité ISO 100

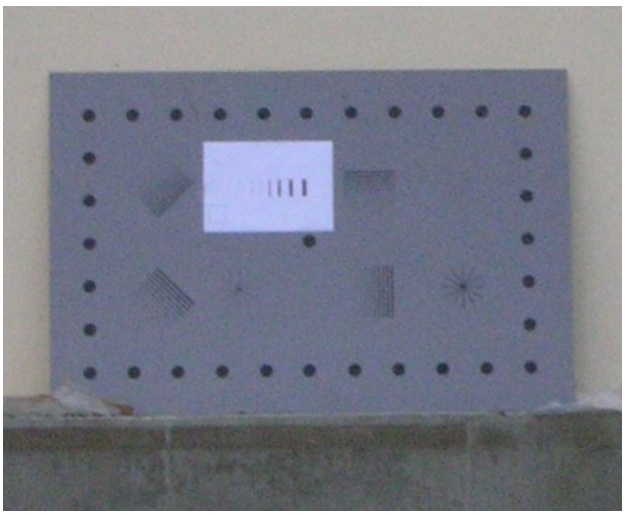


Figure 69: Sensibilité ISO 200

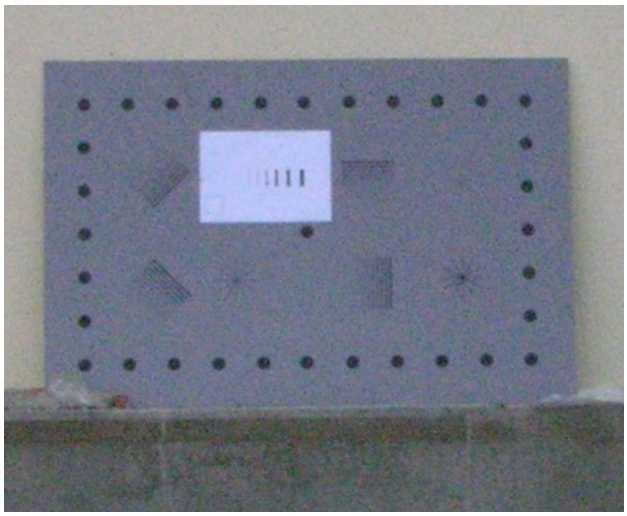


Figure 70: Sensibilité ISO 400

Mesure :

Pour la mesure des paramètres de réglages, notamment la balance des blancs et la sensibilité, on pourra sélectionner l'option « pondérée centrale ». Ainsi l'appareil mesure la lumière sur toute la vue et concentre environ 80% de la mesure au centre de la vue occupant ¼ de la surface totale. Ceci permet de conserver les détails de l'arrière-plan tout en laissant les conditions d'éclairage au centre de la vue déterminer l'exposition. Ainsi, tous les éléments ne présentant que peu d'intérêt pour notre analyse photographique, comme par exemple le ciel ou la végétation se trouvant généralement sur les bords de l'image, ne seront que très peu pris en compte pour le calcul et le réglage de l'exposition.

Compression des images :

Se pose également le problème de la compression des images. Une faible compression garantissant une perte des données minimale est en effet recommandée. Toutefois, des formats tels que le format TIF ou RAW proposés par l'appareil, fournissent des fichiers très lourds (de 12 à 24 Mo) ce qui pose certains problèmes. D'une part, ils génèrent un temps d'attente entre deux prises de photo trop long dû au temps d'enregistrement de la photo sur la carte mémoire et d'autre part, ils remplissent la mémoire de l'appareil photo très rapidement. Un tel format n'est donc pas très adapté pour le drone

qui nécessite la prise d'un volume important de photos et avec une autonomie relativement grande.

L'appareil photo propose également trois niveaux de compression au format JPEG (basic, normal et fine). Une analyse visuelle des différents modes de compression a montré que la qualité de l'image compressée en JPEG Fine était très peu dégradée par rapport à celle d'un format plus lourd ce qui nous permet d'opter pour cette configuration pour la prise des photos du drone. De plus, le format JPEG est celui qui a été choisi pour le logiciel « Interface ».

Résolution des images :

Outre le problème de compression, la grande limitation se trouve malheureusement dans la résolution de l'appareil photo. Un calcul rapide montre que pour la résolution maximale de l'appareil (3264x2448 pixels), à une distance drone-objet de 10 mètre et à une focale fixée à 8,9mm, un pixel de la CCD qui mesure 0,00269x0,00269 mm donnera un pixel terrain d'environ 3x3 mm. On ne peut donc espérer mesurer correctement tout objet ne faisant pas au moins 2 à 3 fois cette dimension, soit des objets d'une taille supérieure à 6mm. Tout objet tel que des fissures d'une taille millimétrique ou inférieure pourra éventuellement être détecté mais en aucun cas ne pourra être mesuré avec précision.

Une solution pour diminuer la taille d'un pixel terrain serait d'augmenter la longueur de la focale. Cependant, l'appareil photo Nikon ne permet pas de fixer manuellement et de façon précise une focale donnée ce qui pose un problème pour la calibration des images. De plus, lorsque la focale est plus grande, on observe une augmentation significative du flou sur les images qui empêche toute exploitation postérieure. Pour ces raisons, la focale de l'appareil est maintenue à 8,9mm qui est la focale minimale (mise en butée) et qui permet un champ étendu diminuant ainsi le nombre de photos du chantier.