



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

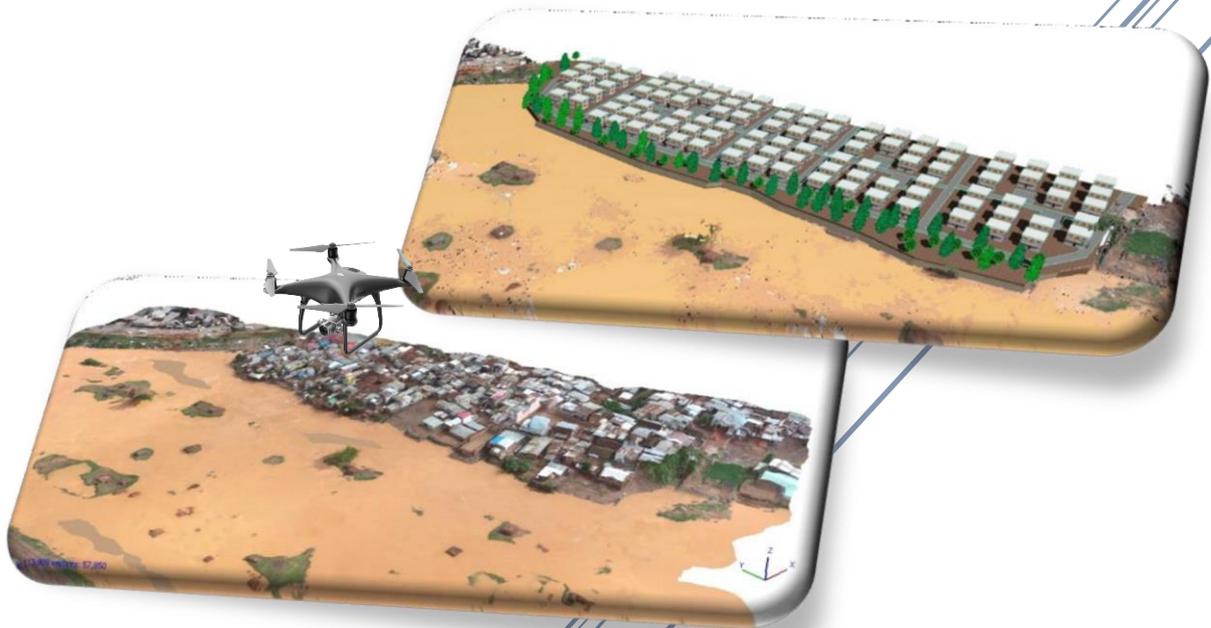
**Mention** : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET AMENAGEMENT DU  
TERRITOIRE

**Parcours** : GEOMETRE - TOPOGRAPHE



**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur-Grade  
Master II en Géomètre - Topographe**

## UTILISATION DE LA TECHNIQUE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE COMBINÉE A LA METHODE 3D POUR L'AMÉLIORATION D'UN ESPACE URBAIN : Cas d'Ampasika, Région Analamanga



**Présenté par** : RANDRIANANTENAINA Anja Harison Oliveli

**Sous la Direction de :**

- ✚ Docteur ANDRIAMASIMANANA Rado : Maitre de Conférences et Enseignant à L'ESPA
- ✚ Madame RAHAJANIRINA Michelle : Ingénieur, Chef de Service de l'Imagerie, Espace et photogrammétrie du FTM

**Date de Soutenance** : Vendredi, 13 Mars 2020

**Promotion 2018**



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

**Mention** : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET AMENAGEMENT DU  
TERRITOIRE



**Parcours** : GEOMETRE - TOPOGRAPHE

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur-Grade  
Master II en Géomètre - Topographe**

## UTILISATION DE LA TECHNIQUE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMERIQUE COMBINEE A LA METHODE 3D POUR L'AMÉLIORATION D'UN ESPACE URBAIN : Cas d'Ampasika, Région Analamanga

**Présenté par** : RANDRIANANTENAINA Anja Harison Oliveli

- Président du jury** : Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Professeur Titulaire,  
Enseignant à l'ESPA
- Encadreur pédagogique** : Monsieur ANDRIAMASIMANANA Rado : Docteur, Maitre de  
conférences et Enseignant à l'Ecole Supérieure Polytechnique  
d'Antananarivo.
- Encadreur professionnel** : Madame RAHAJANIRINA Michelle : Ingénieur, Chef de Service de  
l'Imagerie, Espace et photogrammétrie du FTM et Enseignante à  
l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- Examineurs** :
- Monsieur RAVELOALISON Haja Nirina, Docteur en Hydraulique  
Et Aménagement, Enseignant à l'Ecole Supérieure Polytechnique  
d'Antananarivo.
  - Monsieur RAKOTOZAFY Robert, Géomètre Expert et Enseignant  
à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

# Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Mon Dieu, le Tout Puissant. Son Amour inconditionnel, sa grâce inestimable, et sa grande bénédiction, m'ont permis d'achever toutes les étapes de ma formation à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et d'accomplir ce présent mémoire de fin d'étude. Mes sincères remerciements s'adressent également à :

- Monsieur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Professeur, Directeur de l'ESPA pour nous avoir offerte la possibilité de poursuivre nos études ;
- Monsieur ANDRIAMASIMANANA Rado, Docteur, Maître de conférences et Responsable de la mention Information Géographique et Aménagement du Territoire, pour son dévouement à la recherche de toute amélioration de notre mention et qui m'a aussi encadré en me prodiguant des conseils précieux et m'a consacré une grande partie de son temps pendant l'élaboration de ce mémoire ;
- Madame RAHAJANIRINA Michelle, Ingénieur, Chef de service de l'imagerie, Espace et photogrammétrie du FTM et Enseignante de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour ses directives, ses appuis, ses soutiens et surtout ses encadrements tout au long de la réalisation de cet ouvrage.
- Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Professeur Titulaire, Enseignant à l'ESPA qui, malgré ses innombrables responsabilités, nous fait l'honneur de présider ce mémoire ;
- Monsieur RAVELOALISON Haja Nirina, Docteur en Hydraulique et Aménagement, Enseignant à l'ESPA et Monsieur RAKOTOZAFY Robert, Ingénieur, Géomètre expert et Enseignant à l'ESPA qui ont bien voulu examiner ce présent mémoire malgré leurs nombreuses responsabilités ;
- Tous les enseignants de l'ESPA, notamment ceux de la mention IGAT, qui nous ont fait preuve de compréhension tout au long de nos études ;
- Mes parents et ma famille qui ont toujours été d'un soutien sans faille tant moral que matériel et qui m'ont toujours donné du courage. Que Dieu vous récompense de tout ce que vous avez fait ;
- Mes amis, les étudiants de la Géo-Topo promotion 2018 et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, mes remerciements les meilleurs.



## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>i</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTE DES IMAGES</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>vi</b>
<b>GLOSSAIRES</b> .....	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>PARTIE I : GENERALITES</b> .....	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : PRÉSENTATION DU SUJET</b> .....	<b>4</b>
1.1 Contexte général de l'étude .....	4
1.2 Objectifs .....	4
1.3 Étapes de réalisation .....	5
1.4 Contexte Géographique .....	5
1.5 Choix d'utilisation de la photogrammétrie par Drone.....	9
<b>Chapitre 2 : L'ESPACE URBAIN ET LA MODELISATION 3D</b> .....	<b>10</b>
2.1 Le tissu urbain. ....	10
2.2 L'analyse urbaine et sa relation à la forme tridimensionnelle.....	11
2.3 Règle de l'urbanisme et de l'habitat .....	12
<b>Chapitre 3 : TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE</b> .....	<b>14</b>
3.1 La Photogrammétrie aérienne .....	14
3.2 Description de la plateforme Drone pour une PVA .....	20
3.3 Notion de résolutions [17].....	22
<b>PARTIE II : LA RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE</b> .....	<b>24</b>
<b>Chapitre 4 : PARAMÈTRES D'ACQUISITION D'IMAGES ET ÉTUDE DE PRÉCISION</b> .....	<b>25</b>
4.1 Caractéristiques du DJI Phantom 4 [6].....	25
4.2 focale équivalente et focale réelle .....	27



4.3 Étapes suivies pour l'acquisition .....	29
4.4 Paramètre de vol .....	29
4.5 Étude de précision .....	33
<b>Chapitre 5 : PROCESSUS DE LA RESTITUTION PROPREMENT DITE.....</b>	<b>34</b>
5.1 La restitution photogrammétrique .....	34
5.2 Modélisation du terrain .....	40
5.3 L'orthorectification .....	41
5.4 La restitution.....	42
<b>Chapitre 6 : TRAITEMENT DES IMAGES ACQUISES PAR DRONE.....</b>	<b>43</b>
6.1 Le logiciel Agisoft Photoscan .....	43
6.2 Traitement .....	43
<b>PARTIE III : ANALYSES ET REALISATION DE LA SIMULATION URBAINE EN 3D</b> <b>.....</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre 7 : ANALYSE DES RÉSULTATS.....</b>	<b>56</b>
7.1 La maîtrise du drone .....	56
7.2 Qualité des images.....	59
7.3 Caractéristiques de la reconstruction.....	60
<b>Chapitre 8 : CONCEPTION DE LA SIMULATION URBAINE .....</b>	<b>64</b>
8.1 Les éléments à aménager.....	64
8.2 Détection des éléments à aménager.....	64
8.3 Réalisation en 3D de la zone améliorée .....	67
<b>Chapitre 9 : RECOMMANDATIONS ET COÛTS .....</b>	<b>73</b>
9.1 Guide d'utilisation du drone.....	73
9.2 Coût estimatif du projet.....	74
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>I</b>
<b>WEBOGRAPHIES.....</b>	<b>II</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>III</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>XII</b>



## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Zone risquée par l'inondation.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2 : Constructions illicites et mal urbanisées .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3: Décomposition du tissu urbain.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4: Stéréorestituteur analogique Wild .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 5: Stéréorestituteur analytique LEICA.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 6: Station de photogrammétrie numérique .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 7: Chambre photographique .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 8: Défaut de verticalité de l'axe optique .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 9: Déformation de l'image due à l'effet de perspective .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 10: Composants d'un drone.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 11: Spectre électromagnétique visible.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 12: Domaines d'application et résolutions.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 13: Rapport entre capteur référence et autres capteurs .....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 14: Délimitation de la zone à lever .....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 15: Schéma représentant le processus de travail lors de l'application de techniques de photogrammétrie. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 16: Relation entre le repère image et le repère pixel. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 17: Distorsion radiale et tangentielle.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 18: Méthode d'orientation externe en deux étapes .....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 19: Représentation d'un M.N.T. en mode vectoriel et raster .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 20: Représentation des emplacements des points homologues .....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 21: Alignement des photos sur photoscan .....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 22: Représentation des emplacements des points de contrôle .....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 23: Représentation des points d'appuis sur Photoscan .....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 24: Erreur de reprojection et distances aux rayons .....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 25: Extrait du nuage dense de point.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 26 : Modèle Numérique d'Élévation .....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 27 : Modèle Numérique de Terrain .....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 28 : L'Orthophoto.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 29: Reconstruction tridimensionnelle de la zone .....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 30 : Trajectoire du drone.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 31: Incertitude de positionnement des points homologues identifiés lors de la reconstruction.....</i>	<i>62</i>



<i>Figure 32: Nombre de photos identifiant un point homologue identifié lors de la reconstruction</i>	63
<i>Figure 33: Visualisation des constructions illicites sur Photoscan</i>	65
<i>Figure 34: Détection des habitats en risque d'inondation sur Photoscan</i>	66
<i>Figure 35: Extrait de profilage des habitats implantés côte à côte</i>	67
<i>Figure 36: Condition d'ensoleillement des habitats</i>	68
<i>Figure 37: Plan en 3D de la zone améliorée</i>	70

## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau 1: Comparaison sur l'utilisation des drones aux autres plateformes</i>	21
<i>Tableau 2: Relation entre la focale en pouce et en mm</i>	28
<i>Tableau 3: Caractéristiques de la caméra en WGS84</i>	44
<i>Tableau 4: Caractéristiques de la caméra en coordonnées Laborde</i>	45
<i>Tableau 5: Paramètres liés au positionnement des clichés après aérotriangulation</i>	59
<i>Tableau 6: Paramètres de calibration de la caméra</i>	59
<i>Tableau 7: Précision du modèle reconstruit</i>	60
<i>Tableau 8: Écarts de la reconstruction</i>	61
<i>Tableau 9: Imprécision de la position des points homologues</i>	61
<i>Tableau 10: Nombre de photos observant un même point homologue</i>	62
<i>Tableau 11: Tableau comparatif avant et après l'amélioration</i>	72
<i>Tableau 12: Coût estimatif des ressources humaines durant l'étude du projet</i>	74
<i>Tableau 13: Coût des matériels utilisés et autres</i>	75

## **LISTE DES IMAGES**

<i>Image 1 : Localisation et délimitation du site d'étude</i>	6
---	---



## LISTE DES ABREVIATIONS

**2D** : *Deux Dimensions*

**3D**: *Trois Dimensions*

**AGL**: *Above Ground Level*

**Dpi**: *Dots per inch*

**GCP**: *Ground Control Point*

**GPS**: *Global Positioning System*

**GSD**: *Ground Sampling Distance*

**HALE**: *High Altitude, Long Endurance*

**MALE**: *Medium Altitude, Long Endurance*

**Mb**: *Mégabit*

**MNE** : *Modèle Numérique d'Élévation*

**MNS** : *Modèle Numérique de Surface*

**MNT** : *Modèle Numérique de Terrain*

**MP** : *Mégapixel*

**PVA** : *Prise de Vue Aériennes*

**RGB** : *Red Green Blue*

**RMSE**: *Root Mean Square Error*

**SIFT**: *Scale-Invariant Feature Transform*

**SIG** : *Système d'Information géographique*

**TIFF** : *Tagged Image File Format*

**UAV**: *Unmanned Aerial Vehicle*

**WGS**: *World Geodetic System*



## GLOSSAIRES

**Calibration** : L'étape de calibration détermine et corrige les paramètres intrinsèques de l'appareil photographique (la focale, le point principal, ainsi que les coefficients de distorsion radiales et tangentielles propre à chaque formule optique) par un calcul sur les images.

**Corrélation dense** : mise en correspondance de chaque pixel d'une photographie avec ceux des autres photographies choisies.

**Full Frame** : désigne la taille des capteurs « plein format », équivalent de la surface sensible offerte par les films argentiques 24x36.

**Métadonnées** : informations contenues dans un fichier permettant de le décrire. En photographie numérique, on y trouve des données sur les conditions de prises de vues.

**Photosite** : module électronique sensible à la lumière sur un capteur photographique.

**Points homologues** : points appartenant à des images différentes mais représentant le même point objet.

**Modèle 3D** : représentation tridimensionnelle d'un objet sous forme informatique.

**Nuage de points** : ensemble de points images dont les coordonnées géométriques ont été calculées à partir d'un objet réel par une numérisation 3D. Il s'agit d'un fichier qui contient pour chaque point les coordonnées spatiales (X, Y, Z) et les composantes colorimétriques (Rouge, Vert, Bleu).

**Recouvrement** : pourcentage de superposition de deux photographies.

**Texture** : Surface d'un objet composée de données colorimétriques hétérogènes.



## Introduction

A l'image de certaines grandes villes dans le monde, Antananarivo présente une densité démographique importante sans aménagement bien définie surtout dans la région Analamanga. Chaque année, d'après l'observatoire du Foncier Madagascar, la région accueille environ 200.000 nouveaux migrants alors que la ville affiche une saturation en matière de zone constructible et habitable. Les conséquences de ces faits sont nombreuses : des constructions des bâtiments légers et irrespects de la norme architecturale risqueront à s'effondrer par le fait des catastrophes naturelles sont apparues et qui entrainera la salubrité de la zone après, des taux de constructions illicites et illégales implantées sur les niveaux risqués par l'inondation augmente, et même implantées sans respect le conditionnement d'ensoleillement du voisin tenant compte de l'espacement et la hauteur entre les bâtiments. Le phénomène est de plus en plus prégnant et mérite à être amélioré.

Les actions identifiées et mises en œuvre pour solutionner cette problématique ont été conçues pour refléter sur les apports de l'utilisation des règles d'urbanisme et de l'habitat dans le cadre d'étude de l'amélioration d'un espace urbain. Afin de prendre pleinement en compte ces règles, l'utilisation de données 3D est indispensable. Cette modélisation est fiable pour détecter tous les critères concernant ces fragments urbains. L'usage de données 2D n'est pas suffisant par exemple, pour contraindre la visibilité vis-à-vis au type des constructions que ceux soient légères ou en dures ainsi que la hauteur des bâtiments en vue d'assurer la condition d'ensoleillement entre eux. En plus, les données 2D ne répond pas à la détermination d'altitude du terrain (MNT). Ces données offrent de nouvelles possibilités d'analyses à des échelles différentes de la zone urbaine au quartier pour mieux étudier l'amélioration de la zone.

Actuellement dans un environnement technologique en permanente évolution, le domaine topographique permet de réaliser ce type de modélisation grâce à l'application de la photogrammétrie aérienne. C'est le processus et la validation d'utilisation de cette application qu'apporte cet œuvre intitulé : « *Utilisation de la Technique Photogrammétrie numérique combinée à la méthode 3D pour l'amélioration d'un espace urbain, cas d'Ampasika, région Analamanga* ». L'objectif de cette étude est d'améliorer par une représentation en 3D, l'espace urbanistique de la zone actuelle tout en respectant les règles d'urbanisme et de l'habitat. Pour ce faire, cet ouvrage mettra en exergue sur la détection et l'analyse à partir du modèle 3D de la zone actuelle, les éléments de la scène urbaine à modifier par apparition ou par disparition pour aboutir à cette amélioration.



Cette étude comprend trois parties. La première partie introduira la présentation du sujet puis une brève utilité de la modélisation 3D face à l'amélioration d'espace urbain et quelques notions sur le domaine de traitement photographique sont y ainsi évoqués. La deuxième partie consacrée à la technique et méthode d'acquisition des données puis le processus de traitements afin d'élaborer les modèles numériques de la zone. Et enfin la dernière partie sera dédiée à l'analyse des résultats sur la reconstruction jusqu' à l'étude de simuler le plan en 3D bien améliorée de la zone levée.



## Partie

### I

# Généralités

*La première partie de ce mémoire parle la présentation du sujet concernant le contexte général et géographique de l'étude ainsi l'objectif et l'étape de la réalisation de ce mémoire. Une notion sur la modélisation 3D face à l'amélioration d'un espace urbain est aussi évoquée dans le second chapitre et enfin le troisième chapitre résume les généralités sur le traitement photographique.*



## **Chapitre 1 : PRÉSENTATION DU SUJET**

Ce premier chapitre consiste à expliquer le choix et l'objectif du sujet avec la justification ou contexte géographique de la zone d'application.

### **1.1 Contexte général de l'étude**

Les demandes croissantes en informations en trois dimensions (3D) dans les différentes applications urbaines ont entraîné la définition et l'implémentation de nombreux modèles et méthodes de gestion. On en retrouve un bon exemple dans le développement des systèmes d'informations municipaux pour lesquels l'utilisation d'objets 3D devient de plus en plus importante. Par conséquent, ce sont les systèmes de DAO, offrant depuis longtemps la 3D qui ont été utilisés très largement dans le cadre de l'étude d'un espace urbain.

Madagascar a été suspect à cette étude d'amélioration surtout la ville d'Antananarivo. Vue la croissance démographique à Antananarivo, plusieurs constructions d'habitation sont apparues illicites dans les bidonvilles, même dans les zones interdites à construire indiquant le code d'urbanisme et de l'habitat à Madagascar. La partie entre les fokontany Anosimasina, Commune Rurale d'Itaosy et Andohatapenaka du 1er arrondissement d'Antananarivo Renivohitra a été choisi comme notre zone d'étude, vu que cette zone comprise entre les rives d'Ikopa et qui surtout ne remplis pas les règles d'urbanisme vis-à-vis l'infrastructure urbaine.

La technique photogrammétrique permet de retrouver la troisième dimension depuis des informations en deux dimensions (2D) : les photographies. Les données résultantes du travail photogrammétrique peuvent être reproduites numériquement par des modèles 3D.

### **1.2 Objectifs**

L'objectif global de cet œuvre est d'améliorer l'espace urbain dans la zone levée par drone en respectant les règles imposées par le code de l'urbanisme et de l'habitat.

Les objectifs spécifiques c'est d'élaborer en premier lieu le modèle 3D de la zone urbaine actuelle par la technique photogrammétrique et de le valider en termes de degré de précision.

Nous visons ainsi comme objectif spécifique, la connaissance de tous les éléments à améliorer dans la scène urbaine actuelle le plus important (les bâtiments) en tenant compte du code de l'urbanisme et de l'habitat.



### **1.3 Étapes de réalisation**

Pour avoir ce plan, l'acquisition des données sera primordiale, c'est-à-dire le relevé de la zone photogrammétriquement par un drone. Ainsi les images soient acquises, on passe aux étapes d'application des techniques photogrammétriques : l'orientation interne, l'orientation relative, l'orientation absolue, l'aérotriangulation et toutes les corrections apportées dues à la caméra. Ainsi, la restitution photogrammétrique sera réalisée à partir de la logiciel photogrammétrique Agisoft Photoscan y traité les MNT, MNE, l'orthophoto et un produit vecteur 3D.

Enfin, l'analyse des productions 3D en termes de qualité et la détection des bâtiments en vue d'amélioration selon le code de l'urbanisme et de l'habitat sera consacrée pour élaborer le plan de la zone bien améliorée.

### **1.4 Contexte Géographique**

#### 1.4.1 Localisation du site

Certains facteurs comme le risque d'explosion de la ville à cause de la surpopulation incontrôlée menacent la commune Urbaine d'Antananarivo (région Analamanga).

La Région Analamanga fait partie des Hautes Terres Centrales du pays. Située en son centre et s'étendant sur une superficie de 17 448 km<sup>2</sup>. Elle est délimitée par 5 régions : Betsiboka au Nord, Itasy et Bongolava à l'Ouest, Alaotra Mangoro à l'Est et Vakinankaratra au Sud.

Elle est divisée en cent trente-quatre (134) communes regroupées dans treize districts (13) qui sont : les 6 districts d'Antananarivo Renivohitra, Antananarivo Atsimondrano, Antananarivo Avaradrano, Manjakandriana, Ambohidratrimo, Andramasina, Anjozorobe, Ankazobe.

Notre zone d'étude se situe entre le Fokontany Andohatapenaka et Anosimasina Itaosy du district respectif d'Antananarivo Renivohitra et Antananarivo Atsimondrano ; touchant les deux rives du fleuve d'Ikopa.

Dans le système de projection Laborde, ses coordonnées sont :  $X_{min}= 511\ 464\ m$  ;  $Y_{min}= 799\ 089\ m$  et  $X_{max}= 511\ 757\ m$  et  $Y_{max}= 799\ 457\ m$

Par rapport au niveau moyen de la mer, son altitude moyenne est de 1237m

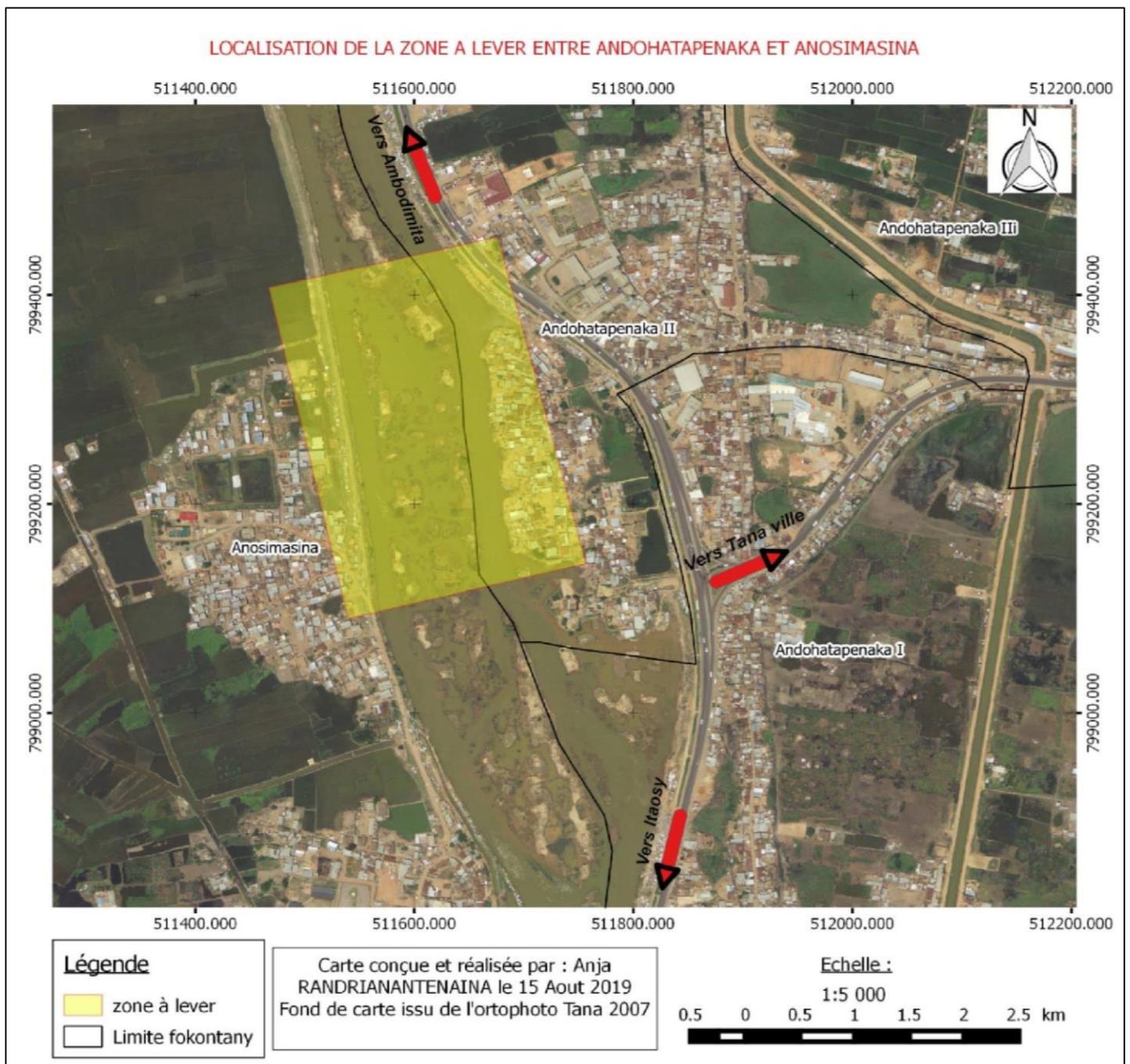


Image 1 : Localisation et délimitation du site d'étude

#### 1.4.2 Les critères de sélection du site et hypothèse de l'étude

Presque quelques zones de la ville d'Antananarivo urbaine ont été concernées à cette étude, surtout dans les zones périphériques. Conséquence à la croissance démographique dans la ville, plusieurs constructions d'habitation sont apparues illicites surtout dans les bidonvilles, même dans les zones interdites à construire indiquant le code d'urbanisme et de l'habitat à Madagascar. Par reconnaissance alors qu'on a choisi la partie entre les Fokontany Anosimasina et Andohatapenaka comme zone d'étude vue qu'elle est concernée à des critères ci-après :



- Tant que zone abordant les deux rives du fleuve d'Ikopa, certaine habitation sont construites sur les terrains exposés à un risque d'inondation.



*Figure 1 : Zone risquée par l'inondation*

(Source : Google Earth 2019)

- On a vu aussi quelques constructions illicites et irrespects de l'espace de quatre mètres imposés entre deux bâtiments non contigus si les baies éclairant les pièces d'habitation y prennent le jour (cf annexe C).



*Figure 2 : Constructions illicites et mal urbanisées*

*(Source : Google Earth 2019)*



### 1.5 Choix d'utilisation de la photogrammétrie par Drone

Bien que les systèmes de télémétrie de vol comme les récepteurs GPS et inertiels intégrés soient de moindre qualité que ceux utilisés dans des systèmes conventionnels comme des avions, il existe plusieurs points qui en compensent grandement les imprécisions :

- Comme l'objectif de la caméra est beaucoup plus rapproché du sol, les déformations sont moindres d'une part ;
- D'autre part l'acquisition avec des recouvrements longitudinaux et latéraux beaucoup plus grands que ce qui est normalement utilisé en photographie aérienne standard (avion) est un prérequis essentiel. En avion, les coûts d'acquisition sont très élevés et il est très onéreux, par exemple d'avoir un recouvrement latéral important, ce qui n'est pas le cas avec les drones. Ceci permet aux logiciels de traitement de l'image d'effectuer une auto corrélation de bien meilleure qualité métrique et de raffiner la solution photogrammétrique finale.
- La verticalité des photos acquises par drone est importante en vue de faire les mesures précises en photogrammétrie.
- La texture des éléments au sol est aussi un facteur important. Si la photographie est prise par forts vents en milieu forestier, par exemple, les résultats de l'auto corrélation seront déficients et cela peut même créer des zones où il devient impossible d'obtenir une solution photogrammétrique rigoureuse.

Plusieurs tests ont été effectués par les formateurs démontrant que le niveau de précision à partir d'un jeu de données acquises par drones est tout à fait comparable s'il est effectué dans le bon contexte et avec tout le soin qu'il nécessite. Des résultats de volumétrie inférieurs à 1.5% de différence avec les levés aériens standards ainsi que des précisions métriques sous les 5-10 centimètres sont possibles.

Choisir le bon drone pour des applications photogrammétriques requiert de bien comprendre les notions pouvant avoir un impact sur la qualité des images, et donc sur la précision et la cohérence du modèle 3D qui en découle.



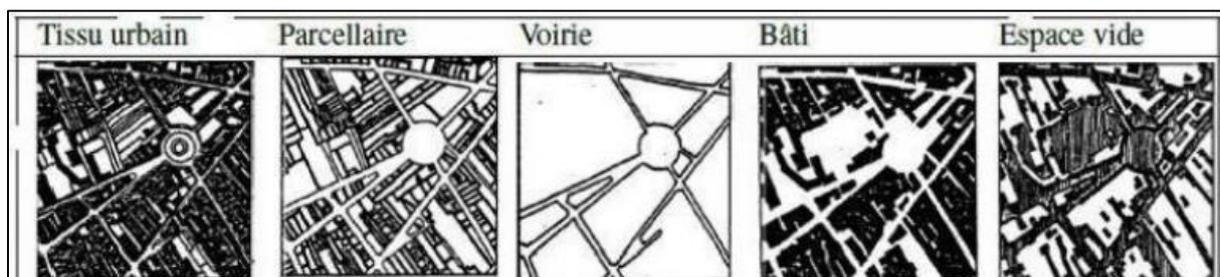
## **Chapitre 2 : L'ESPACE URBAIN ET LA MODELISATION 3D**

On évoquera dans ce deuxième chapitre la complémentarité des données 3D et l'étude d'analyse d'un espace urbain.

### **2.1 Le tissu urbain.**

Ce concept est développé en urbanisme pour décrire le rapport entre espace bâtie en milieu urbain. Il comprend le réseau urbain (villes reliées par les axes sur lesquels circulent des flux), l'armature urbaine (desserte et encadrement territoriale dévolue à l'ensemble des villes). Il est basé sur une organisation hiérarchique des villes entre elles, sur un maillage plus au moins serré. Ainsi en emploie l'expression « système de villes ». En 1984, l'architecte Daniel et l'urbaniste Borie, ont mis au point une méthode d'analyse morphologique. Ils préconisent une décomposition du tissu urbain en quatre systèmes organisateurs :

- Le système parcellaire, système de partition du territoire en unité foncière, la parcelle. Le parcellaire fragmente le territoire.
- Le système voirie, système de liaison du territoire, c'est l'axe structurant.
- Le système bâti, ensemble des masses construites de la forme urbaine, quelles que soient leur fonction ou leur dimension.
- Le système des espaces vides, ensemble des parties non construites de la forme urbaine, que ces espaces soient publics ou privés.



*Figure 3: Décomposition du tissu urbain*

Nous pouvons noter ici la complémentarité entre l'espace vide et le système bâti d'une part ; entre le système voirie et le système parcellaire d'autre part. Le premier couple caractérise l'occupation du sol urbain, tandis que le second constitue le mode de distribution du territoire urbain. La distribution du territoire et s'exprime en deux dimensions alors que l'occupation du territoire est liée à la forme urbaine s'exprime en trois dimensions.



## 2.2 L'analyse urbaine et sa relation à la forme tridimensionnelle

L'analyse urbaine, cherche à expliquer ce qui se passe en un lieu en fonction de ce qui existe en un autre lieu. Elle substitue l'étude des relations horizontales entre des lieux inscrits dans des structures urbaines à celles verticales, qui unissent un lieu à son milieu.

### 2.2.1 La troisième dimension a-t-elle sa place ?

Intégrer la 3D dans les méthodes d'analyse urbaine offre de nouvelles opportunités de recherche dans la mesure où l'espace géographique est tridimensionnel même si jusqu'à présent, l'organisation urbaine n'était appréhendée qu'en deux dimensions. De nombreux concepts d'amélioration d'un espace urbain n'ont pour l'instant été que peu appliqués en 3D : le positionnement des lieux et la localisation, la répartition et la distribution ou encore l'espacement. Il convient donc de s'interroger sur son utilité dans la modélisation et l'explication des phénomènes en géographie et en aménagement proprement dit. Le positionnement des lieux est un des concepts majeurs de l'aménagement urbain. La position est calculée traditionnellement en géographie par le point à l'intersection de deux lignes droites, soit les coordonnées en latitude et en longitude. Pourtant, la position d'un lieu n'implique pas nécessairement les mêmes phénomènes du fait des différences d'altitude pouvant exister. Plus précisément, un bâtiment est assimilé à un ou plusieurs polygone (1D voir 2D au sens de la géomatique) pourtant, elle peut être sinueuse et/ou changer d'altitude (3D).

L'apport de la 3D s'est principalement manifesté dans l'analyse spatiale portant sur des problématiques d'aménagement et d'urbanisme. La concentration des hommes et la constitution des espaces urbains ont souvent été analysées en géographie seulement à partir de la tâche urbaine (2D). Pourtant, le volume urbain (3D), de la même manière, n'a cessé d'augmenter et n'a pas fait l'objet de la même attention. La représentation de la 3ème dimension dont découlent de nouvelles informations (volumes réels, hauteur, surfaces verticales des objets) permet d'abord une meilleure intelligibilité et une représentation plus explicite, complète et transparente des informations disponibles. Le changement d'échelle et d'unité spatiale que ce type d'analyse nécessite était, jusqu'à récemment, difficile à réaliser. Les données relatives à la hauteur des éléments sont produites depuis moins d'une dizaine d'années. La notion d'échelle et de changement d'échelle, propre à l'analyse géographique, nécessitent, l'implication de la 3D puisque, dans sa première acception, le changement d'échelle est un changement de point de vue vertical (on s'éloigne ou on se rapproche de la terre).



### 2.2.2 Avantages

- Donne la possibilité de visualiser différentes configurations de l'amélioration d'un espace urbain, grâce au système de calques.
- Permet la superposition d'autres éléments géographiques comme la circulation des différents modes de transports, requalification de certains bâtiments, etc.
- Elle peut être modifiée en concertation, à la demande, sur des aspects d'aménagement publics (parkings, mobilier, ...);
- On tire profit de la plus-value de la 3ème dimension (altitude) des données géospaciales permettant la perception des hauteurs, des profondeurs et des pentes dans un monde géomatique où les éléments sont superposables.
- Le 3D permet des analyses, des contrôles et des simulations en volumétrie (étude d'ensoleillement, limitations de propagation de radiocommunication, étude de systèmes de ventilation, d'écoulement des eaux, d'inondations ...).

### 2.2.3 Limites

- Il est difficile de gérer les données du sous-sol avec les outils actuels, alors que la connaissance de ces informations est essentielle : on ne déplace pas facilement des grosses canalisations, on déplace plutôt un projet en surface.
- Il n'est pas toujours facile d'expliquer comment va évoluer l'aménagement projeté dans le temps, dans le quotidien des gens. On sort ainsi de la communication.
- Le coût des données 3D en rendu détaillé, qui tend à diminuer, mais qui reste élevé à l'échelle de grands territoires.

Lors de l'élaboration des divers outils d'amélioration d'un espace urbain, les principes fixant le code de l'urbanisme et de l'habitat doivent principalement être respectés.

## **2.3 Règle de l'urbanisme et de l'habitat**

Il s'avère que le code de l'urbanisme n'est pas encore régi par une loi, ce qui implique le non-respect des normes de l'habitat urbain à Madagascar, dont beaucoup parmi les constructions actuelles.

Au rappel de nos contextes, on n'intéresse juste qu'aux trois règles concernant les types, condition d'ensoleillement et implantation des constructions.



D'après la loi n° 63 -192 du 27 mars 1963 fixant le code de l'urbanisme et de l'habitat, modifié par décret n° 69-335 du 29 juillet 1969, on tiendra en compte à ces trois points :

- Le permis de construire doit être refusé si les constructions, par leur situation ou leurs dimensions sont de nature à porter atteinte à la salubrité ou à la sécurité publique ;
- La construction sur des terrains exposés à un risque naturel tel que : inondation, croissements, affaissement, éboulement, peut, si elle est autorisée, être subordonnée à des conditions spéciales dégageant la responsabilité de la puissance publique.
- Un espace d'au moins quatre mètres de largeur sera imposé entre deux bâtiments non contigus si les baies éclairant les pièces d'habitation y prennent le jour. Cette distance pourra être ramenée à deux mètres si aucune ouverture de pièces d'habitations n'y prend le jour.



## **Chapitre 3 : TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE**

Ce troisième chapitre s'introduit à la photogrammétrie aérienne en citant quelques domaines d'application de la photogrammétrie ainsi que la plateforme de la prise de vue (drone) et quelques notions sur la résolution sera épelées à la fin.

### **3.1 La Photogrammétrie aérienne**

#### 3.1.1 Définition [1]

« Science et art dont le sujet d'étude est la photographie dans l'intention de recueillir des données conduisant à des restitutions dimensionnelles et de déterminer la forme et la position d'un objet dans l'espace. »

La photogrammétrie est la science de la mesure géométrique (forme, dimension, position) d'objets à partir d'images. La photogrammétrie englobe donc aussi bien la création des images, les corrections géométriques de ces images et les techniques de restitution.

Le terme « photogrammétrie », assemblage des mots grecs :

- « Photos » (la lumière),
- « gramma » (quelque chose d'écrit ou dessiné),
- « metron » (la mesure).

#### 3.1.2 Histoire de la photogrammétrie

Les techniques ont constamment évolué depuis l'apparition de la photogrammétrie par A. Laussedat vers 1850, en passant par l'élaboration de caméras métriques et par l'invention de l'ordinateur par Zure en 1941. Le premier appareil de restitution stéréoscopique par photographie fut proposé par E. Deville en 1896. La **photogrammétrie analogique** c'est la restitution de l'objet à partir d'un modèle de l'objet créé sur un instrument de précision à partir de la vision stéréoscopique.

Les versions suivantes d'appareils de restitution analogique (par C. Pulfrich, R. Von Orel, G.J. Poivilliers, W. Bauersfeld, H. Wild, H.T. Kelsh) ont été utilisées jusque dans les années 1960, laissant la place aux appareils de restitution analytique.

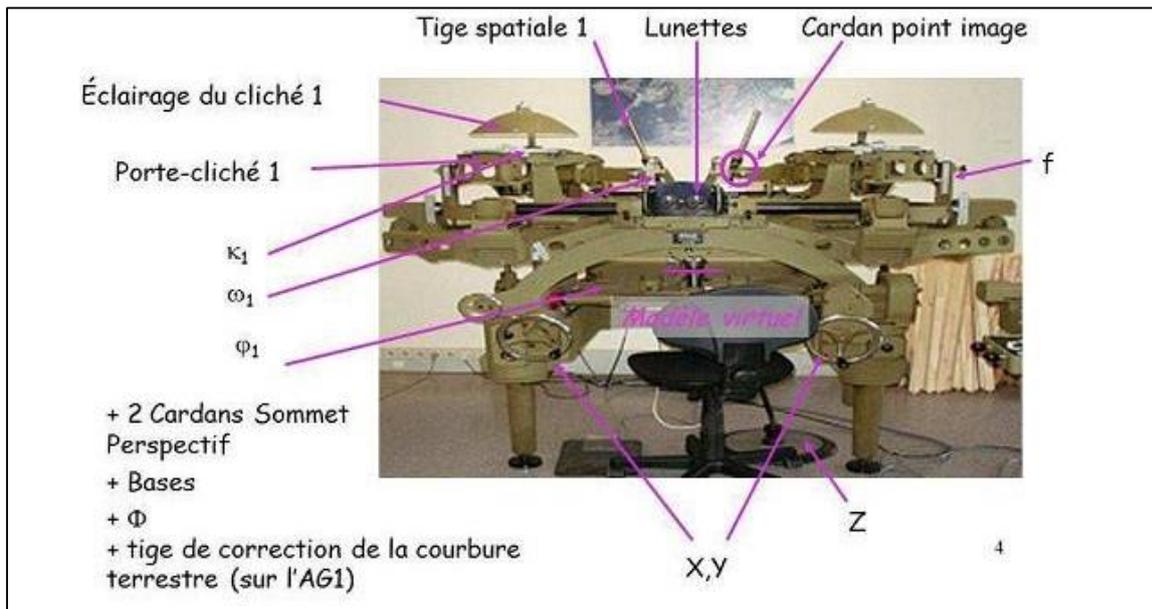


Figure 4: Stéréorestituteur analogique Wild

La **photogrammétrie analytique** ; restitution de l'objet à l'aide d'un modèle mathématique de cet objet calculé à partir de mesures faites sur les deux clichés ; a été utilisé depuis 1960. Le premier restituteur analytique universel fut conçu par U.V. Helava. Les méthodes de résolution mathématique utilisées par l'approche analytique furent cependant développées bien avant. Ainsi S. Finsterwalder publia les principes de photogrammétrie moderne sous forme vectorielle et utilisa la théorie des moindres carrés dès 1899. O. Von Gruber proposa l'écriture dérivée les équations projectives en 1924. E. Merritt publia des travaux significatifs pour la photogrammétrie analytique sur la calibration des caméras, les orientations et le contrôle, dans les années 1950. H. Schmid développa le calcul matriciel pour un nombre quelconque de clichés (méthode de compensation des faisceaux) en 1959 et proposa une étude complète sur la propagation des erreurs. L'approche analytique connaît alors un nouveau tournant avec la possibilité d'automatiser la recherche de points homologues : G. Hobrough démontra le concept de corrélation sur un restituteur analytique, en comparant les niveaux de gris de manière analogique en 1957.



Figure 5: Stéréorestituteur analytique LEICA



La **photogrammétrie numérique** apparaît dans les années 90, démocratisant considérablement cette technique de mesure, en particulier parce que les coûts sont fortement réduits. C'est une méthode de production automatique des mesures 3D à partir d'un modèle mathématique des prises de vue et de méthodes de traitement numérique des images. Vers 1970, H.M.S. Karara propose une nouvelle méthode pour résoudre l'orientation des caméras non métriques, basée sur les équations de colinéarité et l'approximation des inconnues en photogrammétrie dite rapprochée (photographies faites à moins de 300 m de la cible).



Figure 6: Station de photogrammétrie numérique

Ces travaux ainsi que l'essor du domaine de la robotique ouvrent la voie vers de nouvelles approches, entièrement automatiques pour des applications non cartographiques.

### 3.1.3 Principe de base

La photogrammétrie exploite la faculté de l'homme à percevoir le relief de deux images planes d'un objet, prises en deux points de vue différents. Par d'autre explication, le principe général est basé sur la perception humaine du relief par observation stéréoscopique.

Le but de la photographie aérienne est de fournir des informations sur la représentation vraie de la terre, y compris le relief. Cette technique est réalisée par restitution photogrammétrique ou compilation stéréographique. Néanmoins, il existe d'autres produits 2D qui peuvent être obtenus à partir de photographies aériennes.

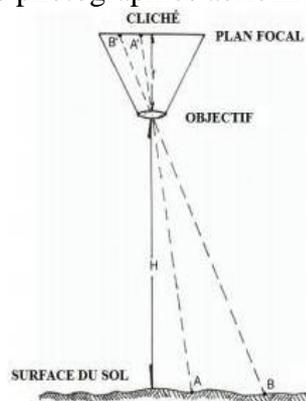


Figure 7: Chambre photographique



Les explications qui suivent reposent d'abord sur l'expression de l'échelle en photographie aérienne :

$$e = \frac{A'B'}{AB} = \frac{f}{H} \quad [\text{mm}]$$

Où l'échelle  $e$  de l'image est égale au rapport entre la distance focale  $f$  et l'altitude de vol  $H$  (pour une chambre photographique à axe vertical).

Bien qu'un objectif soit en réalité un système optique centré à double foyer, il est assimilé sur le schéma à une lentille mince placée au centre optique. Cette simplification est suffisante pour un calcul approximatif d'échelle. On constate aussi que  $H$  étant  $\gg$  que  $f$ , l'image se forme dans le plan focal.

Un changement d'altitude de vol entraîne un changement d'échelle ; un défaut de verticalité de l'axe de prise de vue se traduit par des variations d'échelle en différents points du cliché. Par exemple, un rectangle ABCD sur la terre pourra être représenté par un trapèze A'B'C'D' sur le cliché, sur lequel l'échelle du segment A'B' sera plus petite que celle du segment C'D'.

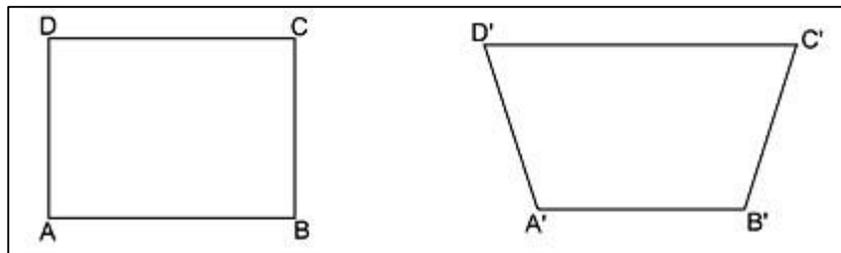


Figure 8: Défaut de verticalité de l'axe optique

De plus, si certaines structures présentent des différences de hauteurs significatives, il y aura d'autres variations d'échelle sur les clichés qui ne pourront être résolues que par traitement 3D tel que la stéréorestitution. Des corrections pour changement d'altitude et d'axe de vol peuvent être apportées par processus photographique 2D, mais elles ne sont réalisables que pour les surfaces planes.

Des dispositifs spéciaux fournis avec la caméra permettent de procéder aux rectifications mentionnées ci-dessus en utilisant un système de projection de l'image sur écran.

Par une série d'actions combinées, le système étire l'image projetée afin de réaliser une mise au point tenant compte des pentes. La méthode de rectification la plus courante consiste à faire coïncider quatre points convenablement répartis avec leurs positions connues. Il existe aussi des procédés numériques 2D équivalents pour aboutir au même résultat.

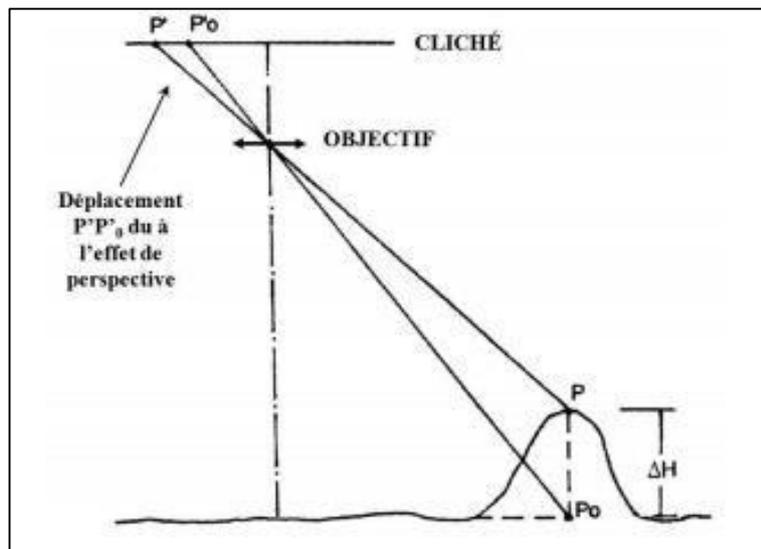


Figure 9: Déformation de l'image due à l'effet de perspective

Les limites de ces procédés apparaissent dans la représentation des points situés à une certaine hauteur au-dessus de la surface environnante et qui subissent une déformation de perspective sur l'image. À noter qu'en plus de la différence d'altitude  $\Delta H$ , la distance du point au pied de l'axe vertical de la caméra augmente la déformation. En d'autres termes, les points situés à proximité de l'axe vertical de l'appareil de prise de vues ne présentent pas de déformations importantes.

Une méthode alternative de production d'images non déformées, dite orthophotographie, consiste à combiner le processus photographique avec le traitement 3D.

La meilleure façon de représenter la terre par photographies consiste à réaliser un mosaïquage d'orthophotos à échelle uniforme. Une méthode de qualité moindre consiste à rectifier la mosaïque comme indiqué ci-dessus. La méthode la moins précise consiste à assembler les clichés bruts en adoptant une échelle approximative, fonction de l'altitude moyenne de vol.

Le choix du procédé de rectification doit toujours être précisé afin d'observer la prudence de rigueur en regard de la qualité métrique du produit réalisé.



### 3.1.4 Modélisation 3D en Photogrammétrie

#### 3.1.4.1 *Situation actuelle*

De nos jours, la modélisation 3D est une expression qui a plusieurs significations : elle englobe l'action d'enregistrer, d'exploiter et de présenter des données 3D. La photogrammétrie permet de retrouver la troisième dimension depuis des informations en deux dimensions. Les données résultantes du travail photogrammétrique peuvent être reproduites numériquement par des modèles 3D. Ces modèles peuvent être traités avec des logiciels de modélisation 3D, afin de réaliser des maquettes qui peuvent être utilisées dans divers domaines tels que le domaine d'étude d'un espace urbain.

La photogrammétrie comprend toutes les techniques qui permettent l'extraction de grandeurs depuis une photographie. Elle utilise la photographie essentiellement comme un objet d'étude pour l'analyse de l'image qui permet d'extraire une information métrique. Théoriquement, toutes les photographies peuvent être utilisées pour réaliser des mesures sur les objets photographiés. Par les techniques photogrammétriques, il est possible de retrouver la troisième dimension à partir d'informations en 2D. L'informatique permet de traduire cela par des modèles 3D. On va donc étudier ces modèles 3D pour améliorer un espace urbain. On se basera donc sur les modèles des bâtiments 3D.

#### 3.1.4.2 *Obtention des images numériques*

Les images numériques sont obtenues soit par numérisation de tirages argentiques soit par prises de vue directement numériques. Ces images numériques orientées sont à la base de la photogrammétrie numérique qui exploite des couples d'images stéréoscopiques. L'approche photogrammétrique consiste à recueillir une série de clichés argentiques (numérisés après développement) ou d'images numériques de l'objet étudié. Chacune des images ainsi obtenues représente une projection plane centrale de l'objet 3D. A partir de deux images ayant une partie commune et de quelques points connus en coordonnées dans la zone de recouvrement, il est possible par recouplement des deux projections, de déterminer les coordonnées 3D de tout point de la zone commune. L'intérêt de cette méthode est de permettre une analyse structurale fine et précise. Ses inconvénients sont sa lourdeur de mise en œuvre et la difficulté, voire l'impossibilité pratique de l'automatiser pour obtenir rapidement un modèle nécessaire pour des réalisations en 3D. Deux possibilités sont offertes par cette approche : l'examen manuel ou l'analyse automatique de corrélation entre les deux images [Cord 1998].



- Dans l'examen manuel, le couple d'image est observé en stéréoscopie à l'aide d'un dispositif et d'un logiciel approprié. C'est l'opérateur qui décide des points dont il veut retrouver les coordonnées. On parle alors de restitution 3D.

- L'analyse automatique de corrélation entre images permet quant à elle de mettre automatiquement en correspondance les pixels homologues d'image à image et de recalculer leur position tridimensionnelle. Le produit de cette analyse est un semi de point décrivant la surface de l'objet étudié. La photogrammétrie aérienne nous permet donc d'avoir des modèles en 3D que l'on peut exploiter pour étudier un espace urbain.

### 3.2 Description de la plateforme Drone pour une PVA

#### 3.2.1 Définition et éléments composant d'un drone

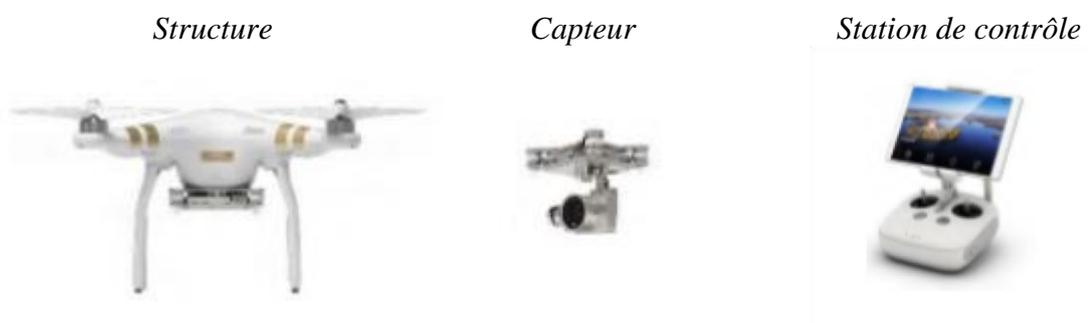
##### 3.2.1.1 *Définition [19]*

Un drone ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) est un aéronef inhabité, piloté à distance, semi-autonome ou autonome, susceptible d'emporter différentes charges utiles le rendant capable d'effectuer des tâches spécifiques pendant une durée de vol pouvant varier en fonction de ses capacités.

Cependant, le terme drone commence à être utilisé pour tout objet piloté à distance. On parle ainsi de drones terrestres ou sous-marins sans que ceux-ci ne soient des aéronefs. Dans la suite du rapport, le terme drone ne représentera que les aéronefs.

##### 3.2.1.2 *Éléments Composants*

Le drone est composé de trois parties : la structure, le système de pilote automatique et la station de contrôle. Ces trois parties sont indépendantes et interchangeables les unes des autres car elles sont souvent fabriquées par différentes entreprises. Cependant elles sont aussi complémentaires et certaines combinaisons sont plus efficaces selon la catégorie du drone.



*Figure 10: Composants d'un drone*

La structure comprend les ailes, les hélices, la nacelle et le châssis du drone. Le système de pilote automatique comprend le GPS, la centrale inertielle, la gestion des déplacements du



drone en vol et de la nacelle, la gestion des batteries. La station de contrôle comprend la radiocommande permettant de piloter le drone en vol, les logiciels de vol automatique et l'ensemble FPV (First Person View) dans les cas où il y en a un.

### 3.2.2 Comparaison sur l'utilisation des drones par rapport à la plateforme standard (avion)

Plateformes	Avantages	Désavantages
<b>Avion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande économie, distance et altitude</li> <li>- Plus grande couverture photographique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requier un endroit dégagé pour le décollage surtout pour l'atterrissage - Difficile ou même presque impossible à piloter en vol à vue par le pilote</li> <li>- Photo vertical seulement, quelques conditions pour oblique.</li> </ul>
<b>Drone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décollage et atterrissage vertical - Vol lent ou stationnaire → Plus haute résolution photographique</li> <li>- Flexibilité des modes de pilotage - Supporte mieux les caméras gyrostabilité → meilleur contrôle de la verticalité</li> <li>- Permet la photographie oblique, de détail et la vidéo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requier plus d'énergie par unité de temps en vol : moins de distance et moins de couverture photographique (max 15-20 min)</li> </ul>

Tableau 1: Comparaison sur l'utilisation des drones aux autres plateformes

### 3.2.3 Système de stabilisation de caméra

Un système appelé 'nacelle' qui tient le capteur d'un drone permet de stabiliser les axes du roulis et du tangage de la caméra. Les mouvements horizontaux sont effectués en faisant pointer l'appareil dans une direction différente. Dans une telle configuration, le mouvement de roulis est souvent verrouillé à l'horizontale et ne possède pas d'ajustement fin mais il est quelquefois possible d'assigner l'un des canaux de la télécommande radio pour les ajustements fins sur cet axe. Le mouvement de tangage est généralement assigné à l'un des canaux de la télécommande, ce qui permet de modifier l'angle de visée de la caméra entre l'horizontale (axe de visée vers l'horizon) et la verticale (axe de visée vers le nadir) et toutes les positions entre les deux pour des photos obliques. Une nacelle peut être contrôlée par le pilote de l'appareil,



puisque ce dernier ne fait que des corrections d'angle de visée de temps en temps et que ces corrections n'occupent qu'une partie de son temps.

Les nacelles possèdent leur propre capteur inertiel et leur propre système qui applique la rétroaction appropriée sur deux axes de rotation qui supportent la caméra. Lorsqu'une nacelle de caméra est générique et qu'elle est conçue pour s'adapter à plusieurs modèles différents de caméras, il faut toujours installer la caméra de manière à réduire les efforts de positionnement des mouvements de rotation au minimum. Il faut ensuite utiliser un logiciel de configuration qui permet d'ajuster les paramètres des boucles de rétroaction pour obtenir un mouvement fluide et sans vibrations, travail qui peut quelquefois être fastidieux.

### 3.3 Notion de résolutions [17]

La notion de résolutions est extrêmement importante, aussi bien en photogrammétrie pure et dure qu'en télédétection. Il faut bien faire la différence entre la résolution spatiale (ou géométrique) et la résolution spectrale (ou radiométrique).

La résolution spatiale peut être résumée par la taille du pixel au sol (*GSD* pour *Ground Sampling Distance*, taille d'échantillonnage au sol, taille d'un pixel dans l'espace objet), exprimée en mètres ou plus fréquemment en centimètres. Cette résolution spatiale est à ne pas confondre avec le nombre de pixels de la matrice CCD. C'est une notion également importante, mais qui ne suffit pas à elle seule pour appréhender un système. La course à la meilleure résolution spatiale est permanente.

$$\text{Résolution spatiale} = \frac{\text{taille d'un photosite} \times \text{hauteur de vol}}{\text{distance focale}}$$

La résolution spectrale peut être expliquée simplement par le nombre de canaux ou bandes spectrales acquis simultanément. Ce nombre varie d'un (panchromatique, *toutes les couleurs* visibles résumées en un ton de gris), à plusieurs centaines pour des capteurs hyperspectraux. La majorité des capteurs photogrammétriques acquièrent trois, quatre canaux (bleu, vert, rouge et parfois proche infrarouge).

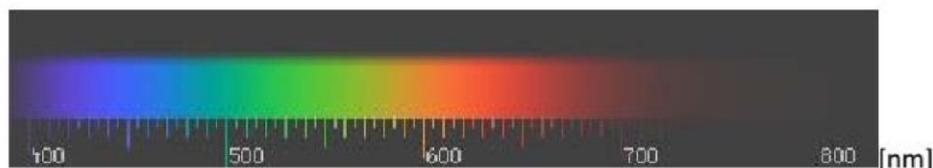


Figure 11: Spectre électromagnétique visible



### 3.3.1 Résolution spatiale vs résolution spectrale

À chaque application correspond une résolution spatiale et une résolution spectrale optimales. L'échelle logarithmique pour la résolution spatiale n'est pas superflue, car si on inclut les applications « extrêmes » comme la météorologie (résolution : 1 km) et l'inventaire d'objets historiques (résolution : 1 mm), on a une magnitude de  $10^6$ . Les valeurs de résolution spectrale seront étudiées plus en détails en télédétection.

Comme on le voit dans le graphique ci-dessous, la résolution spatiale est inversement proportionnelle à la résolution spectrale.

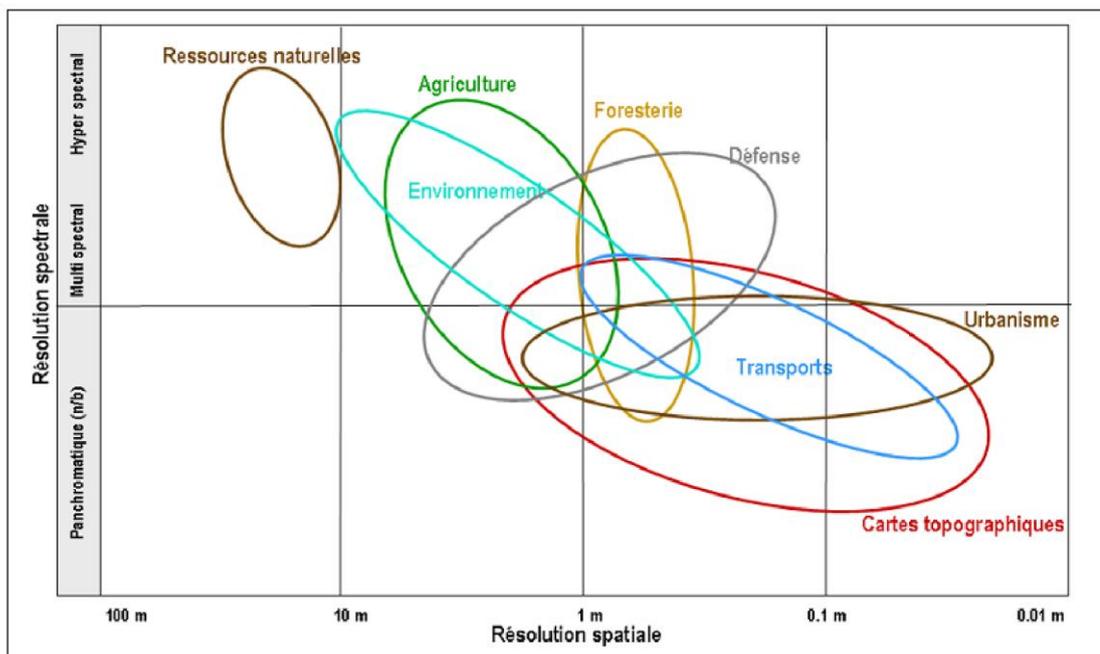


Figure 12: Domaines d'application et résolutions

### 3.3.2 Résolution proposée en milieu urbain

La résolution constitue une évolution majeure des types de données utilisées. Elle doit être définie en fonction des spécifications cartographiques. Selon la précision recherchée, autant sur le plan de la localisation métrique qu'en terme de représentation des objets, une représentation image plus ou moins fine sera exigée [Cord 1998]. La majorité des travaux traitent des données dont la résolution la plus grande est de l'ordre de 30 x 30 cm pour l'imagerie aérienne. Pour traiter des images de sites industriels ou d'habitats collectifs de grande taille, une résolution métrique est suffisante. Sur des zones péri-urbaines où les bâtiments sont séparés les uns des autres, la plupart des travaux sont réalisés avec des images moyennes résolutions. Lorsque la scène représente un paysage plus dense, les systèmes proposés pour la reconstruction du bâti utilisent généralement une résolution supérieure à 30 x 30 cm.



## Partie

## II

# *La Reconstruction tridimensionnelle*

*On développera dans cette deuxième partie trois chapitres qui parleront les paramètres d'acquisition d'images, ensuite on étudiera le processus pour aboutir à la restitution, et enfin le traitement d'image avec des logiciels spécifiques pour l'élaboration du plan 3D.*



## **Chapitre 4 : PARAMÈTRES D'ACQUISITION D'IMAGES ET ÉTUDE DE PRÉCISION**

Ce chapitre a pour but de présenter de façon théorique l'application de la technique photogrammétrique suivant la procédure de calcul ainsi le protocole d'acquisition de données. Pour le levé, on a utilisé le drone à voilure tournante, le DJI Phantom 4.

Le Phantom 4 de la marque DJI est le drone ultime du moment, il s'agit d'un drone caméra haut de gamme avec des capacités hors-du commun. C'est sans aucun doute le drone le plus évolué de l'année 2017 dans la gamme des drones civils récréatifs. Ce drone possède une caméra permettant de filmer des vidéos et de réaliser des prises de vues au format 4K, le rendu est parfait grâce à un grand nombre de capteurs permettant de stabiliser la caméra en plein vol et ce, même lorsque le Phantom 4 réalise une pointe de vitesse de 72 km/h.

### **4.1 Caractéristiques du DJI Phantom 4 [6]**

Comme c'est déjà mentionné dans le second chapitre, un drone est composé principalement de la structure ou l'appareil proprement dit, la caméra embarquée ou le capteur, la station de contrôle ou la radiocommande.

#### **4.1.1 La structure**

La structure comprend les ailes, les hélices, la nacelle et le châssis du drone. Ci-après ses caractéristiques :

Poids (batterie incluse) : 1380 g

Diagonale (Sans hélice) : 350 mm

Vitesse ascensionnelle maximale : 6 m/s (Mode S) (cf. annexe D)

Vitesse de descente maximale : 4 m/s (Mode S)

Vitesse maximale : 72 km/h (Mode S)

Altitude pratique maximale au-dessus du niveau de la mer : 6 000 m (limite d'altitude du logiciel : 120 m au-dessus du point de décollage).

Résistance au vent max. : 10 m/s

Systèmes de positionnement satellite : GPS/GLONASS

Stabilisation 3 axes (inclinaison verticale, roulis, panoramique)

Plage réglable Inclinaison vertical : de -90° à +30°



Vitesse de contrôle angulaire max. : Inclinaison : 90°/s

Précision du contrôle angulaire :  $\pm 0,01^\circ$

Temps de vol max : Environ 28 minutes.

Cette estimation de temps de vol dépend de la capacité de la batterie de vol dont sa caractéristique est ci-après :

Type : LiPo 4S

Capacité : 5 350 mAh

Tension : 15,2 V

Énergie : 81,3 Wh

Poids net : 462 g

Plage de températures de fonctionnement De -10 à 40 °C (14 à 104 °F)

Puissance de charge max. : 100 W.

#### 4.1.2 La radiocommande

Le pilote guide le drone à l'aide d'une radiocommande. Cette dernière est constituée de deux touches de direction et d'un support pour l'appareil de visualisation. Voici ses caractéristiques :

Fréquence de fonctionnement : 2,400 - 2,483 GHz et

Distance de transmission max. :

- Norme FCC : 5 km
- Norme CE : 3,5 km (sans obstacles ni interférences)

Batterie : 6000 mAh LiPo 2S

Puissance de l'émetteur (EIRP) 2,400 GHz - 2,483 GHz

- FCC : 26 dBm
- CE : 17 dBm

Courant et tension de fonctionnement : 1,2 A à 7,4 V

Support pour appareil mobile : Pour tablette ou téléphone.

#### 4.1.3 Le caméra

Capteur : CMOS 1/2,3"(pouce)

Pixels effectifs : 12M

Objectif : FOV (champ de vision) de 94°, 20 mm (équivalent au format 35 mm),



f/2,8 focus à l' $\infty$ .

Taille d'Image Max. : 4000×3000 pixels

Plage ISO : 100 - 3200 (Vidéo)

100 - 1600 (Photo)

Plage de températures de fonctionnement De 0 à 40 °C (32 à 104 °F)

La focale réelle : 3.61mm (La focale réelle n'est pas affichée dans les informations publiques, l'internet).

#### 4.2 Focale équivalente et focale réelle

Les spécifications techniques du manuel du drone précisent que sa caméra a une focale de 3.61 mm et que la focale équivalente est de 20 mm. L'expression « focale équivalente » est utilisée en photographie pour exprimer l'angle de champ de l'objectif. Par le passé, une très grande majorité des photos étaient enregistrées sur des films/négatifs de 36 mm. Il est possible de déterminer si l'objectif était un objectif grand-angle ou un téléobjectif simplement par sa focale. Aujourd'hui, les tailles des capteurs n'étant plus de 24 × 36 mm, à l'exception des capteurs *full-frame* (plein format), cette identification du type d'objectif par sa focale n'est plus valide. Il faut dès lors préférer l'expression *focale équivalente*, qui permet de se ramener à cette identification rapide de l'angle de champ. La focale équivalente est obtenue par la formule suivant :

$$\text{Focale équivalente} = \text{facteur de recadrage} \times \text{focale réelle [mm]}$$

Pour avoir alors cette focale équivalente, il est nécessaire de trouver le coefficient de conversion appelé aussi **facteur de recadrage**. C'est le coefficient permettant de passer la taille du capteur réelle à la taille de référence 24 × 36 mm, déterminé sur la longueur et la hauteur.

Ce coefficient est propre à chaque type d'appareil photo et ne dépend que du boîtier, quel que soit l'objectif qui y est monté.

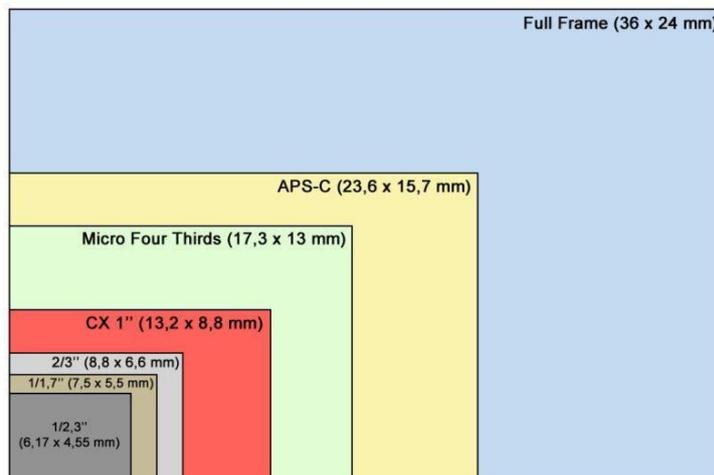


Figure 13: Rapport entre capteur référence et autres capteurs



D'après la fiche technique du drone DJI Phantom 4, son capteur a pour taille de 1/2,3 pouce et de focale réelle 3.61 mm.

Voici un tableau permettant de mettre en relation la focale en pouce et en mm :

Taille capteur (Appellation)	Dimensions* (en mm)			Superficie (mm <sup>2</sup> )	Rapport d'image	Coef. de conversion focale
	Hauteur	Largeur	Diagonale			
1/4"	2,4	3,2	4	7,7	4/3 (1,33)	10,8
1/3"	3,6	4,8	6	17,3	4/3 (1,33)	7,2
1/2,5"	4,29	5,76	7,2	24,7	1,34	6
1/2,3"	4,5	6,2	7,7	27,9	1,38	5,6
1/2"	4,8	6,4	8	30,7	4/3 (1,33)	5,4
1/1,7"	5,7	7,6	9,5	43,3	4/3 (1,33)	4,6
2/3"	6,6	8,8	11	58,1	4/3 (1,33)	3,9
1"	8,8	13,2	15,9	116,2	3/2 (1,5)	2,7
Micro 4/3	13	17,3	21,6	224,9	4/3 (1,33)	2
1,5"	14	18,7	23,4	261,8	1,34	1,9
APS-C 1,6x	14,9	22,3	26,8	332,3	3/2 (1,5)	1,6
APS-C 1,5x	15,7	23,7	28,4	372,1	3/2 (1,5)	1,5
APS-H	18,6	27,9	33,5	518,9	3/2 (1,5)	1,3
Plein format (Full Frame)	24	36	43,3	864	3/2 (1,5)	1

Tableau 2: Relation entre la focale en pouce et en mm

Un Capteur de 1/2.3 pouce a une taille équivalente de 4.5mm × 6.2mm. Pour venir à 24×36 mm en moyenne, le facteur de recadrage est de 5.6.

La focale équivalente est donc de :  $5.6 \times 3.61 = 20.04 \cong 20mm$ .

Ainsi, notre capteur a alors :

- Focale réelle de 3.61 mm
- Focale équivalente de 20 mm

La focale réelle est utilisée uniquement lors du traitement d'image. Dans le reste des calculs, ce sera la focale équivalente.



### 4.3 Étapes suivies pour l'acquisition

Tout vol par aéronef nécessite l'étude des points suivants. Certains d'entre eux ne sont pas nécessaires dans une prise de vue par drone mais y figurera car, sont indispensables dans d'autres types d'appareils.

Tout d'abord la consultation de la carte aéronautique du secteur et repérages des zones règlementées (aérodromes...) ceci n'est pas indispensables pour un levé par drone. La rédaction de la fiche de la mission qui permettra de suivre la mission.

Obtention des autorisations préalables auprès de la préfecture, de la commune.

Préparation de l'aéronef : chargement des batteries, préparation du plan de vol, préparations du capteur embarqué.

Pour une prestation de photogrammétrie les points suivants sont obligatoires :

- Définition de la zone de survol
- Définition du parcours du drone. Le plus souvent, ceci est automatisé via le logiciel de navigation mais nous l'avons effectué manuellement.

Les taux de recouvrement des photos en longitudinal et transversal sont respectivement de 60% et de 25%

- Le temps de vol en fonction des batteries utilisées.
- La direction du vent, consulté au niveau de la prévision météorologique.
- Définition des points de repérage au sol. Ces points peuvent être des points caractéristiques qui seront visibles sur l'image finale, soit des repères à mettre en plan avant la mission. Ces points doivent être repérés par un levé terrestre.

### 4.4 Paramètre de vol

#### 4.4.1 Détermination de la hauteur de vol

La hauteur de vol du drone est définie au départ du GSD sachant que légalement, en Italie, il est interdit de dépasser 70 m *Above Ground Level* (AGL) pour un usage privé et 150 m pour un usage professionnel. Ce dernier correspond à la distance au sol séparant le centre de deux pixels consécutifs.

Pour un GSD donné, il est possible de déterminer la hauteur de vol au départ de la longueur focale, de la taille du capteur de l'appareil photo embarqué par le drone et de la taille de l'image formée.



➤ Ground Sampling Distance

Le GSD correspond à la distance au sol séparant le centre de deux pixels jointifs.

Théoriquement, Il peut être calculé à l'aide de la formule :

$$GSD = \frac{H * S_{det} * 100}{I_{m_w} * f}; [m/pixel] \quad [16]$$

Avec : H : la hauteur de vol [m]

$S_{det}$  : la hauteur du capteur [mm],

$I_{m_w}$ : La longueur de l'image [pixel],  
 $f$ : la focale réelle [mm].

D'après les paramètres du capteur du DJI Phantom 4 :

$$f = 3.61 \text{ mm}$$

$$S_{det} = 4.5 \text{ mm}$$

$$I_{m_w} = 4000 \text{ pixels}$$

Donc on a  $GSD = 2.81 \text{ cm/pixel}$

Pour s'assurer une marge de sécurité suffisante quant à l'autonomie du drone, nous avons préféré un vol à une hauteur de 90 m.

5.4.2 L'échelle de prise de vue  $e = 1/E_{pv}$

$$\frac{1}{E_{pv}} = \frac{f}{H} \quad [1]$$

$$E_{pv} = \frac{90000}{20} = 4500$$

Soit l'échelle de prise de vue  $e = 1/5000$

4.4.3 La Surface de la zone photographiée

➤ Pour une photo

La surface enregistrée par une photo vaut  $A = l * L$  (L et l, longueur et largeur au sol enregistrées sur une photo) lorsque la surface photographiée est parallèle au plan de la photographie.

Pour GSD 2.81 cm/pixel et la taille d'une photo = 4000 × 3000 pixels :

$$L = 112.4 \text{ m}$$

$$l = 84.3 \text{ m}$$

Donc la surface de la zone photographiée sur une photo vaut 9475.32m<sup>2</sup>.



- Pour 15 photos de 2 bandes avec un recouvrement longitudinal de 60% et un recouvrement latéral 25% :

$$S = [(L \times (1 - 60\%) \times 7) + l] \times [(L \times (1-25\%) + L]$$

$$\Rightarrow S = 320.34 \times 196.7 = \mathbf{63010.88m^2}$$



Zone à lever

(fond: Google Earth 2019)

Figure 14: Délimitation de la zone à lever

#### 4.4.4 Distance parcourue

La distance à parcourir lors du vol dépendra de la hauteur de vol car la surface observée sur une image variera avec la hauteur. Pour 90 m de hauteur, la longueur et largeur d'une photo est respectivement  $L = 112.4$  m et  $l = 84.3$  m sur terrain.

De façon générale, la distance totale à parcourir est donnée par la formule :

$$\text{Distance} = \text{Arrondi}_{\text{supp}} \left[ \frac{196.7}{((1-25\%) \times l)} \right] \times [((1-25\%) * l) + \dots] ; [m] \quad [1]$$

Avec la dimension de la zone photographiée  $320.34m \times 196.7m$  :

La distance à parcourir du drone = 1 150.70 m



#### 4.4.5 Vitesse horizontale

La vitesse horizontale peut créer un flou sur l'image si le déplacement est trop important durant le temps d'ouverture du diaphragme. En conditions normales d'éclairage, on peut supposer qu'une sensibilité d'ISO-100 et un temps de pose  $t$  de 1/120 s pour chaque photo permettront de réaliser des prises de vue de bonne qualité.

La vitesse horizontale maximale correspond à la limite pour laquelle le flou créé par le déplacement du drone est égal à 1. Il suffira de faire voler le drone à une vitesse inférieure pour que le flou ne soit pas visible sur les photos.

On peut donc calculer :

$$V_{max} = \frac{GSD}{t} ; [m/s] \quad [1]$$

Avec  $GSD = 2.81$  cm/pixel et  $t = 1/120$  s

$$V_{max} = 3.37 \text{ m/s}$$

#### 4.4.6 Durée du vol

Grâce à la distance de vol en fonction de la hauteur choisie et à la vitesse maximale trouvée, il est possible de déterminer la durée nécessaire pour effectuer le vol à 90m d'hauteur.

La durée du vol est donnée par la formule :

$$\text{Durée du vol} = \frac{\text{Distance}}{V_{max}} ; [s] \quad [1]$$

Avec une distance = 1 150.70 m à la vitesse  $V_{max} = 3.37$  m/s :

La durée du vol du drone = 6 min

Ainsi, à cette hauteur de vol de 90 m, les valeurs des paramètres sont les suivantes :

- Largeur d'une photo : 84.3 m ;
- Longueur d'une photo : 112.4 m ;
- Surface couverte par la photo : 9 475.32 m<sup>2</sup> ;
- GSD : 2.81 cm/pixel ;
- Distance totale à parcourir : 1 150.70 m ;
- Vitesse maximale : 3.37 m/s ;
- Durée de vol : 6 min.



## 4.5 Étude de précision

### 4.5.1 Précision planimétrique

La précision planimétrique théorique des mesures tridimensionnelles est déduite par cette formule :

$$\sigma_p = \pm \text{GSD} \times \sigma_{pi} ; [\text{mm}] \quad [1]$$

Avec H : Hauteur de vol

GSD : taille du pixel au sol

$\sigma_{pi}$  : précision du pointé en pixel (généralement 0,5 pixel)

Pour GSD = 2.81 cm/pixel :

La précision planimétrique  $\sigma_p = \pm 14.05 \text{ mm}$  sur terrain

Pour une échelle de sortie 1/1000, l'erreur sur papier sera  $\pm 0.014 \text{ mm}$

➤ Tolérance planimétrique

$$T_P = 0.2 \times E_G ; [\text{mm}] \quad [1]$$

Pour une échelle de sortie 1/1000,  $E_G = \frac{1}{10} \times 1000 = 10 \text{ cm}$

Donc la tolérance planimétrique  $T_P = 20 \text{ cm}$

### 4.5.2 Précision altimétrique

$$\sigma^A = \pm \frac{B}{H} \times \text{GSD} \times \sigma_{pi} ; [\text{mm}] \quad [1]$$

Avec B: base entre prises de vue

H : hauteur de vol

$\sigma_{pi}$  : précision du pointé en pixel (généralement 0,5 pixel)

Pour un recouvrement latéral 25% et  $l = 84.3 \text{ m}$  :

$$B = l \times (1 - 25\%) = 63.225 \text{ m}$$

Donc la précision altimétrique  $\sigma_A = \pm 10 \text{ mm}$

En photogrammétrie numérique avec des visées multiples, le B/H recommandé est entre 0,1 et 0,7 (Cours ESGT 2018). [1]

On a  $0.1 \leq \frac{B}{H} = 0.7 \leq 0.7$  ; donc c'est Tolérable.



## Chapitre 5 : PROCESSUS DE LA RESTITUTION PROPREMENT DITE

Ce chapitre a pour but de présenter de façon théorique le processus de la restitution photogrammétrique incluant tous les calculs à chaque étape.

### 5.1 La restitution photogrammétrique

Le processus de travail lors de l'application de techniques de photogrammétrie depuis l'acquisition des données jusqu'à la finition du travail est représenté par cette schéma :

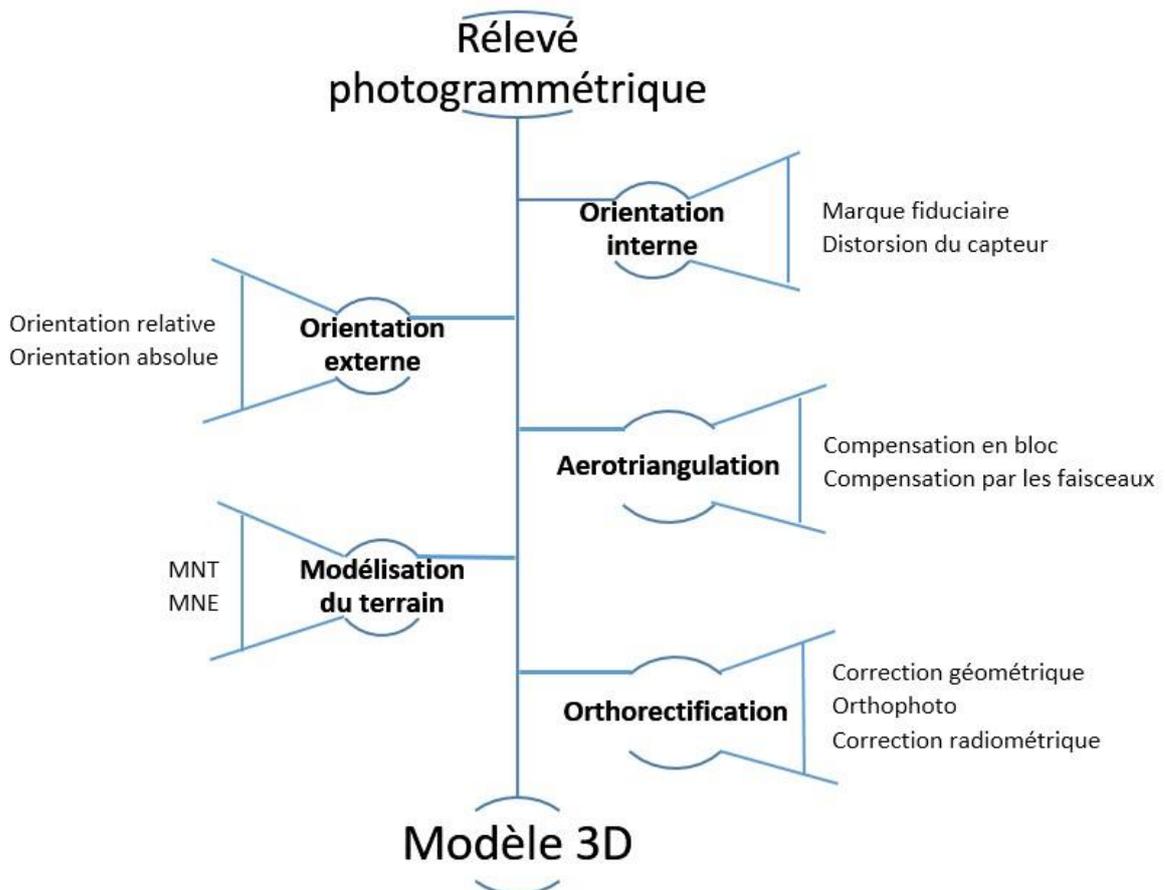


Figure 15: Schéma représentant le processus de travail lors de l'application de techniques de photogrammétrie.

Le travail photogrammétrique s'exécute en premier lieu par l'acquisition d'image ce qu'on appelle lever photogrammétrique. En effet, la donnée essentielle pour l'application de ce travail est un groupement d'image.

Pour cette étude, on a choisi d'utiliser le Drone comme moyen d'acquisition dont on développera dans le chapitre suivant les caractéristiques du Drone utilisé et les paramètres d'acquisition d'image.

Ainsi les données sont acquises, le processus de détermination d'un point 3D à partir de ces photographies peut se dérouler en plusieurs étapes.



### 5.1.1 Orientation interne

Le but de l'orientation interne est de passer d'un système de coordonnées pixel à un système de coordonnées propres aux photos. Le système de coordonnées « photo » est généralement défini à partir de marques fixes liées à la chambre de prise de vue ou la marque fiduciaire.

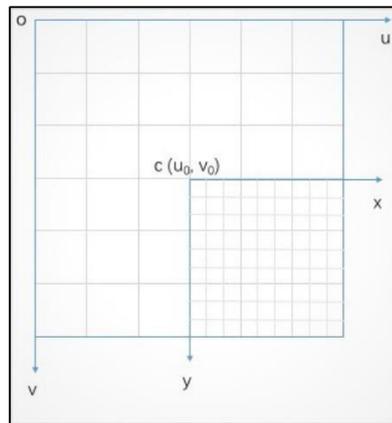


Figure 16: Relation entre le repère image et le repère pixel.

#### 5.1.1.1 La marque fiduciaire

L'une des étapes associées avec le calcul dans l'orientation interne implique la détermination de la position de l'image c'est-à-dire, du point principal. Toutefois, la position de l'image par rapport aux repères fiduciaires sont mesurés sur l'image même et seront comparés aux coordonnées calibrées de chaque marque fiduciaire. Tant que le système de coordonnées dans l'espace n'est pas encore défini pour chaque image, les coordonnées des images mesurées de chaque repère fiduciaire seront référencées à un pixel. Le système de coordonnées se définit par la colonne et la ligne. L'origine du système de coordonnées pixel est le haut coin gauche de l'image ayant une valeur de (0,0) en ligne et colonne respective.

Ce changement de coordonnées est une transformation plane linéaire de la forme :

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1 x + a_2 y \\ Y = b_0 + b_1 x + b_2 y \end{cases}$$

Pour résoudre ce système à 6 inconnues 3 points suffisent. Toutefois les chambres professionnelles de prises de vue possèdent 4 à 8 repères de fond de chambre, cette surabondance de points permet donc le calcul de l'estimation de l'erreur de l'orientation interne.



Il est possible d'affiner l'orientation interne et d'augmenter la précision des calculs en appliquant une correction sur les mesures tenant compte des distorsions radiales et des déformations de l'objectif.

### 5.1.1.2 Distorsion de l'objectif

La distorsion de l'objectif détériore la position exacte du point image localisé sur l'image en plan. En général, deux types de distorsions sont considérés :

Les **distorsions radiales** sont à attribuer au fait que les lentilles ne sont pas parfaitement minces et qu'elles présentent des défauts de courbure. Elles provoquent un décalage du pointimage par rapport à sa position dans le cas d'un système de lentille parfait. Ce décalage est radial par rapport au point principal et est de l'ordre du dixième de millimètre pour les appareils photographiques d'amateurs ;

Les **distorsions tangentielles**, apparaissent lorsque l'assemblage des lentilles sur l'objectif est incorrect. Elles sont souvent accompagnées de distorsions radiales.

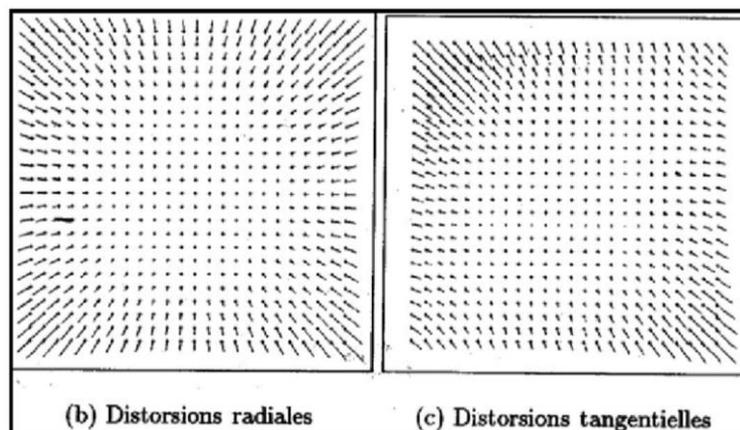


Figure 17: Distorsion radiale et tangentielle

### 5.1.2 Orientation externe

L'orientation externe se propose de déterminer les paramètres permettant le calcul des coordonnées « terrain » d'un point quelconque, à partir de ses coordonnées « photo » sur les deux clichés du couple stéréo et des coordonnées « terrain » de quelques points de calage. On souhaite, pour cela, déterminer les douze éléments d'orientation suivants à l'aide des points de calage: pour la photo1  $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \phi_1, \kappa_1)$



Et pour la photo2  $(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \phi_2, \kappa_2)$

Avec  $(X_0, Y_0, Z_0)$  ; les coordonnées « terrain » du centre de l'objectif

$(\omega, \phi, \kappa)$  ; Les angles de rotation entre les référentiels « photo » et « terrain ».

Cette étape peut être réalisée directement lorsque l'on possède un lien entre les mesures sur le cliché et le système de référence. Lorsque nous ne possédons pas cette information, l'orientation externe peut être réalisée en deux étapes.

Tout d'abord on réalise une orientation relative pour replacer la gerbe de rayons perspectifs de chaque cliché dans les mêmes positions et orientations que celles de la prise de vue (Collignon, 2010). Ensuite, on transforme le modèle vers un système de coordonnées.

Cette transformation est appelée orientation absolue en photogrammétrie.

### 5.1.2.1 L'orientation relative

L'orientation relative va déterminer les coordonnées d'un point P quelconque non pas dans le référentiel « terrain » mais dans un référentiel a priori quelconque. Par commodité, on choisit d'exprimer les coordonnées des images dans le référentiel lié à l'une d'entre elles. Ceci permet de s'affranchir de la connaissance de la position des images par rapport au terrain.

L'orientation relative ne requiert aucun point de calage.

Cette opération doit positionner les deux clichés entre eux de telle manière que pour tout point du terrain, les droites spatiales définies par les centres de l'objectif ( $O_1$  et  $O_2$ ) et la position du point sur les images 1 et 2, se coupent en un même point, i.e., les rayons perspectifs appartiennent à un même plan.

Cette condition de planéité peut s'exprimer par le produit mixte :

$$(O_1p_1 \wedge O_2p_2) \cdot O_1O_2 = 0$$

Avec  $O_1$  et  $O_2$ , les centres de perspectives de l'image 1 et l'image 2

$p_1$  et  $p_2$ , les points homologues d'un même point Pi.

Si les droites spatiales homologues ( $O_1p_1$ ) et ( $O_2p_2$ ) se coupent alors elles sont dans le même plan que la base( $O_1O_2$ ). Ce plan est appelé le plan épipolaire associé au point P. Le point P de coordonnées  $(x, y, z)$  dans le référentiel de l'image de droite est défini comme l'intersection dans l'espace des deux droites ( $O_1p_1$ ) et ( $O_2p_2$ ).

Chaque image est identifiable par 6 inconnues :

- Les coordonnées du centre de perspective  $(x, y, z)$ ,
- Les composantes du vecteur unitaire de l'axe optique de la caméra  $(U, V, W)$ .



Douze inconnues sont alors à définir.

L'une des images étant choisie comme référentiel, on fixe 6 inconnues sur les 12 inconnues initiales.

Dans ce référentiel, les paramètres de l'image 1 sont connus :

- $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$ , trois paramètres de translation,
- $(U_1, V_1, W_1) = (0, 0, 1)$ , trois paramètres de rotation.

Il reste à définir les 6 inconnues  $(x_2, y_2, z_2)$  et  $(U_2, V_2, W_2)$  de l'image 2.

On définit une valeur arbitraire pour  $x_2$  (écart sur l'axe des coordonnées x des deux centres de perspective). Il ne reste plus que 5 inconnues alors à définir. Il faut donc un minimum de cinq couples de points homologues visibles sur les deux photographies pour définir ces inconnues. Le modèle photogrammétrique est créé dans le système relatif à l'une des images lorsque les rayons perspectifs homologues se recoupent en au moins 5 points. Si cette condition est remplie, alors tous les rayons perspectifs homologues issus des points images correspondants doivent s'intersecter. Les points d'intersection décrivent alors la forme de l'objet mais ne décrivent ni sa position dans l'espace ni ses dimensions.

#### 5.1.2.2 L'orientation absolue

Afin de rattacher ces coordonnées arbitraires ou relatives au système global ou absolu, des points d'appuis sont introduits. Il s'agit de l'étape de l'orientation absolue.

L'orientation absolue concerne la transformation du système de coordonnées arbitraire ou relatif du modèle issu de l'orientation relative vers celui de l'espace objet absolu. Elle fait partie de l'orientation externe et utilise la transformation de similitude 3D. Cette transformation contient trois translations, trois rotations et un facteur d'échelle. Avec sept paramètres à résoudre, le problème d'orientation absolue nécessite au moins trois points d'appui (dont 3 observations pour chaque point). Le modèle mathématique de cette transformation de similitude 3D est exprimé par ces équations :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} + m \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Où :

X, Y, Z : coordonnée en système absolu (espace objet)

x, y, z : coordonnée en système arbitraire ou relatif (espace modèle)

$X_M, Y_M, Z_M$  : translations en 3D

r : matrice de rotation concernant les rotations  $\omega, \varphi$  et  $\kappa$

m : facteur d'échelle

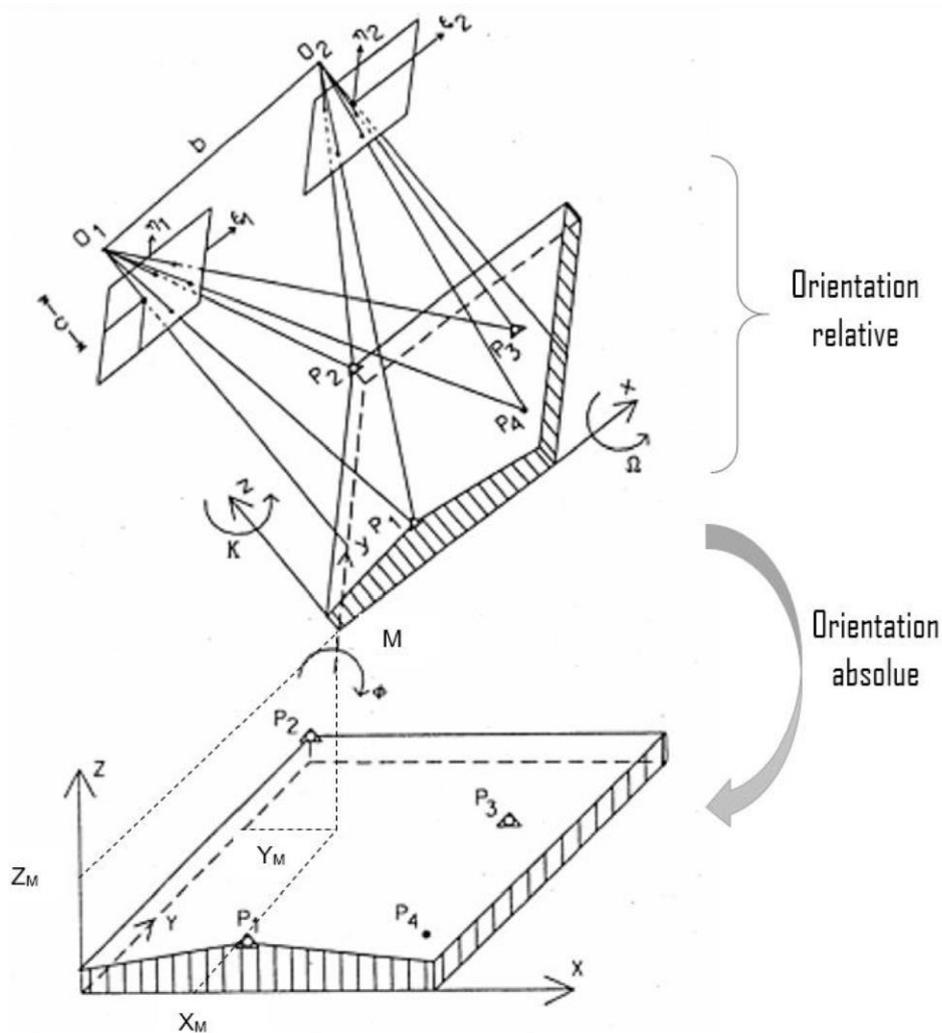


Figure 18: Méthode d'orientation externe en deux étapes

### 5.1.3 L'Aérotriangulation

Le recalage géométrique détaillé ci-dessus nous montre qu'il faut disposer d'un nombre minimum de trois points de calages identifiés sur deux clichés, connus dans le système de coordonnées désiré pour permettre le recalage. Ces points doivent donc être identifiés visuellement par appariement sur les images et sur le terrain par méthode topographique et/ou géodésique.

L'aérotriangulation est une méthode permettant de réaliser l'orientation externe d'un grand nombre de clichés (appelé bloc de clichés) réalisés lors d'un vol photogrammétrique tout en minimisant le nombre de points de calage à déterminer sur le terrain (Henry, 1999).

La restitution d'un bloc de clichés par aérotriangulation peut se faire par deux méthodes de calcul différentes.



La première méthode est une **compensation en bloc par modèles indépendants**, basée sur un géoréférencement sans point d'appui au sol. L'emploi de cette méthode requiert l'utilisation de chambres métriques lors de la prise des clichés pour déterminer les coordonnées, correspondant à l'orientation relative, qui seront ensuite transformées dans le système de coordonnées terrain, ce qui correspond à l'orientation absolue. Les chambres métriques ont une orientation interne stable référencée par des marques fiduciaires dont les paramètres internes restent stables au-cours du temps. Le problème lié à ces chambres métriques est leur coût d'acquisition. Par ailleurs, cette méthode est très sensible à la position des points de calage dans la précision de la transformation vers le système de référence cartographique ou topographique choisi.

La seconde méthode est dite de **compensation par les faisceaux** ou *bundle adjustment*. Il s'agit d'une méthode transformant directement les coordonnées-image en coordonnées terrain. Cette méthode nécessite que les images du bloc de clichés aient un recouvrement longitudinal et transversal suffisant de respectivement 60 % et 20 % au minimum (Henry, 1999). Malgré cette contrainte, il s'agit de la méthode la plus précise pour effectuer le processus d'aérotriangulation, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de plateforme « amateur » tel qu'un drone et d'appareils de prise de vue « grand public » pour l'acquisition de données. Elle permet en effet d'intégrer dans la résolution des inconnues supplémentaires telles que les paramètres d'orientation interne. Remarquons qu'au plus d'inconnues sont intégrées dans la compensation, au plus le nombre de points de calages total doit être élevé.

## 5.2 Modélisation du terrain

Une représentation précise du relief est indispensable pour de très nombreuses applications de gestion du territoire. Les modèles numériques de terrain (MNT) et des modèles numériques d'élévation (MNE) sont des représentations simplifiées de l'altimétrie du sol.

Le **Modèle Numérique de Terrain** (M.N.T.) est une représentation numérique discrète ou continue de la forme et de la position de la surface du terrain.

Il existe principalement deux familles de Modèles Numériques de Terrain qui correspondent aux modes de représentation informatique de l'information graphique en général et de l'information géographique en particulier : le mode vectoriel, et le mode « raster ». Un M.N.T. en mode vectoriel est essentiellement représenté sous forme de bloc diagramme, alors qu'un M.N.T. en mode « raster » peut être représenté graphiquement soit sous une forme cartographique « classique » (les teintes variant en fonction de



l'altitude des points du M.N.T., sous forme de bloc diagramme (raster en perspective) ou bien d'une combinaison des deux par drapage de l'image sur le bloc diagramme.

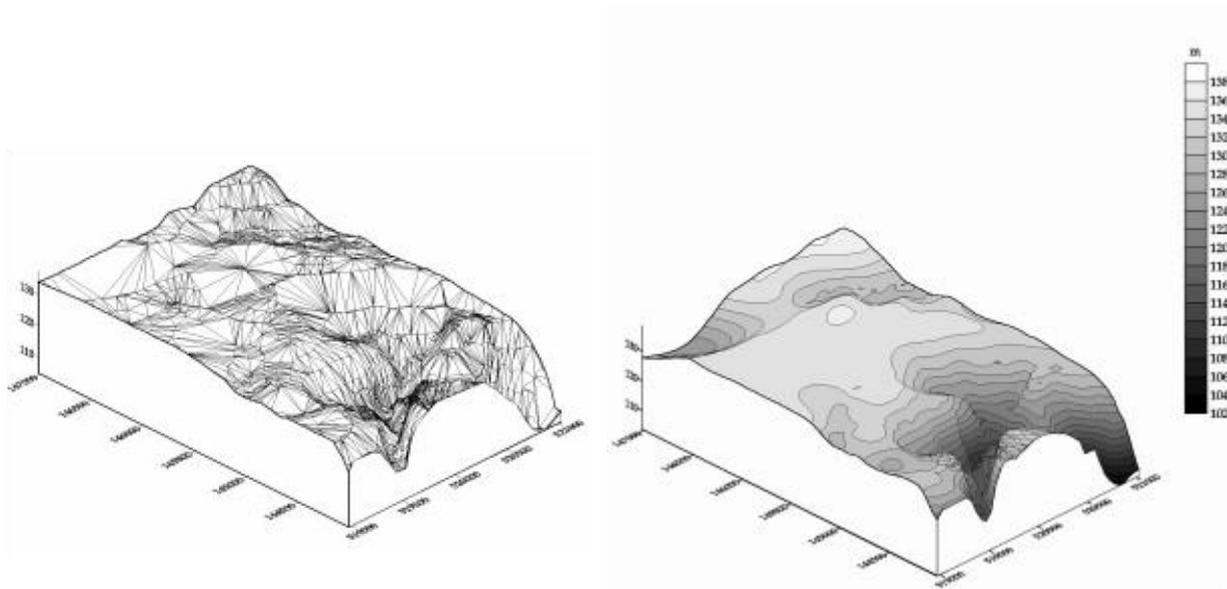
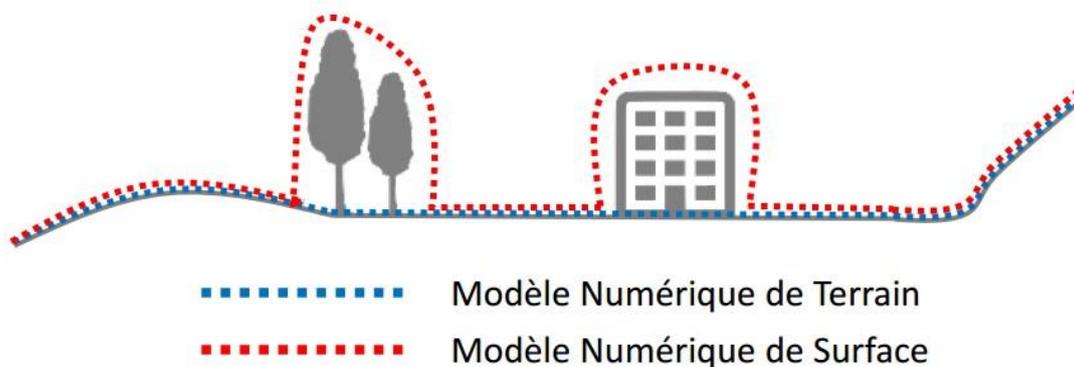


Figure 19: Représentation d'un M.N.T. en mode vectoriel et raster

Le **Modèle Numérique d'Élévation** (M.N.E.) est une représentation numérique discrète ou continue de la surface d'un terrain augmentée de l'élévation des éléments qui composent son sursol (bâtiments, culture, forêt, ...).



### 5.3 L'orthorectification

L'orthorectification est le processus de suppression des effets de déplacement du relief, de la distorsion du capteur optique et de la perspective géométrique de l'image originale. Dans les photos habituelles, les objets proches de la caméra apparaissent plus grands que les objets de même taille qui se trouvent plus loin de la caméra. Pour cette raison, la détermination de la taille correcte des objets ou leur position exacte par rapport à un système de coordonnées est un problème complexe. Afin d'utiliser l'imagerie optique comme une carte ou dans un



environnement SIG, toutes les distorsions géométriques doivent être corrigées. L'image résultante est appelée **orthophoto**.

La qualité d'orthophoto est assurée par trois principes de conformité de la qualité :

**La fidélité géométrique**, c'est-à-dire que toutes les alignements et formes du monde réel doivent être correctement reflétés dans les données.

**La précision absolue** indique à quel point les coordonnées d'un point sur la photo sont de mêmes que celles trouvées sur le terrain. Les points de contrôles au sol utilisé précédemment dans l'aérotriangulation sont situés et mesurés sur l'orthophoto pour assurer la précision nécessaire.

**L'exactitude radiométrique** est la mesure de l'équilibre des couleurs, la luminosité et le contraste de l'image. Les propriétés radiométriques de l'orthophoto varient selon la nature de la topographie.

#### **5.4 La restitution**

La restitution photogrammétrique combine systématiquement deux images qui ont été photographiées depuis différents points. Une fois l'orientation interne et externe de chaque image déterminée, il est possible de calculer la position de tous les points-objet représentés sur au moins deux images. Étant donné qu'il s'agit de résoudre un système de quatre équations avec 3 inconnues, X, Y, Z, sa résolution permet d'évaluer également l'incertitude sur la détermination du point-objet. Le résultat de la restitution conduit à la définition des points, qui, couplées avec les points définis lors de l'étape d'orientation interne et externe, fournissent la base du modèle 3D de la scène. Ces points peuvent être ensuite utilisés pour créer des lignes ou polygones et être retravaillés dans des logiciels de modélisation 3D.



## **Chapitre 6 : TRAITEMENT DES IMAGES ACQUISES PAR DRONE**

Ce chapitre se focalise sur le traitement des images acquises par drone qui s'effectue à partir d'un logiciel open source Agisoft Photoscan afin d'élaboration le plan 3D de la zone relevée.

### **6.1 Le logiciel Agisoft Photoscan**

Agisoft Photoscan est un autonome qui effectue un traitement photogrammétrique des images numériques afin de générer des données 3D. Basée à Saint-Petersbourg, la société Agisoft a été fondée en 2006 en tant qu'entreprise de recherche spécialisée en vision par ordinateur.

Basé sur une technologie de pointe développée par Agisoft, il permet un traitement très rapide, et produit des résultats très précis (jusqu'à 3 cm de précision pour la photo aérienne, et jusqu'à 1 mm pour la photographie de courte portée).

### **6.2 Traitement**

Pour effectuer ce processus de traitement, il est nécessaire d'énumérer les données dont nous disposons :

➤ Les caractéristiques de la caméra :

Nom de la caméra : FC330

Focale réelle : 3.61 mm

Taille de pixel : 0.00170167mm Taille photos : 4000 × 3000 pixels

➤ Les images :

Bloc d'image composé de 15 photos

Nombre de bandes : 2

Recouvrement longitudinal : 60%

Recouvrement latéral : 25%

Généralement, le but final du traitement de photographies avec PhotoScan est de construire un modèle 3D texturé. Cette opération a été réalisée exclusivement dans le logiciel La procédure de traitement de photographies et de la construction de modèles 3D comprennent quatre étapes principales.



### 6.2.1 L'orientation des images

C'est l'étape où les positions et les orientations des images sont déterminées. Il s'agit de la partie d'orientation externe /relative rencontrée dans la photogrammétrie. Dans ce cas-là, nous aurons directement les coordonnées de chaque cliché mesuré par GPS à bord du drone.

Nous remarquons que les coordonnées obtenues sont dans le système WGS84. Le tableau ci-après montre les caractéristiques des photos y inclure les rotations ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $k$ ) pour obtenir la position relative de la caméra.

Les données des photos dont nous disposons sont ceux des centres de photos :

PhotoID	$\lambda$ [°DEC]	$\phi$ [°DEC]	Z[m]	$\omega$ [deg]	$\phi$ [deg]	K [deg]
DJI_0001	47.4983	-18.9058	1324.7533	0.4970	1.8586	22.7619
DJI_0002	47.4979	-18.9057	1324.3237	0.2094	1.4365	22.7505
DJI_0003	47.4976	-18.9056	1324.4191	0.2117	1.5847	22.4140
DJI_0004	47.4974	-18.9052	1324.9193	0.2064	1.8598	21.9146
DJI_0005	47.4971	-18.9048	1325.2141	0.4235	2.0322	21.4310
DJI_0006	47.4970	-18.9043	1325.4798	0.6263	2.1252	20.5272
DJI_0007	47.4968	-18.9039	1325.3295	0.7852	2.1784	16.0400
DJI_0008	47.4967	-18.9034	1325.4198	0.6522	2.0703	30.2606
DJI_0009	47.4962	-18.9034	1322.6675	-0.3096	-0.8258	-162.9045
DJI_0010	47.4964	-18.9039	1322.2792	-0.3565	-0.7571	-163.0243
DJI_0011	47.4965	-18.9044	1321.9129	-0.4596	-0.5819	-163.1212
DJI_0012	47.4966	-18.9049	1321.8968	-0.6978	-0.6587	-163.7713
DJI_0013	47.4967	-18.9054	1322.2759	-0.9247	-0.7211	-171.9146
DJI_0014	47.4968	-18.9058	1322.7125	-1.0776	-0.7438	-172.1995
DJI_0015	47.4968	-18.9063	1323.2709	-1.0847	-0.6945	-170.4357

Tableau 3: Caractéristiques de la caméra en WGS84

Remarque : L'altitude Z mentionné ci-dessus c'est l'altitude du drone par rapport au niveau zéro de la mer. C'est-à-dire y comprise la hauteur de vol.



N'étant pas un système de coordonnées utilisable à Madagascar, le WGS84 doit être converti en système de coordonnées Laborde. L'Agisoft photoscan même peut effectuer cette transformation.

PhotoID	X[m]	Y[m]	Z[m]
DJI_0001	511761.57	799168.17	1324.753
DJI_0002	511718.15	799173.67	1324.324
DJI_0003	511687.66	799192.61	1324.419
DJI_0004	511662.64	799230.30	1324.919
DJI_0005	511639.16	799276.66	1325.214
DJI_0006	511620.88	799328.50	1325.480
DJI_0007	511608.85	799381.52	1325.330
DJI_0008	511588.83	799431.04	1325.420
DJI_0009	511542.38	799429.76	1322.668
DJI_0010	511557.14	799377.41	1322.279
DJI_0011	511571.59	799324.56	1321.913
DJI_0012	511586.18	799271.34	1321.897
DJI_0013	511594.33	799216.75	1322.276
DJI_0014	511599.12	799161.98	1322.713
DJI_0015	511604.40	799107.30	1323.271

Tableau 4: Caractéristiques de la caméra en coordonnées Laborde

Pour ce fait, le logiciel Photoscan cherche des points homologues pour chaque couple stéréoscopique et il calcule l'orientation externe en utilisant la méthode d'ajustement des faisceaux.

Chaque couple de photos doit disposer au moins six points homologues et seront placés de la façon ci-après :

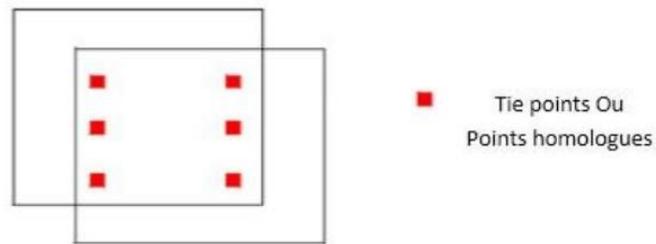


Figure 20: Représentation des emplacements des points homologues

Le résultat est ainsi un nuage de points dit clairsemé :

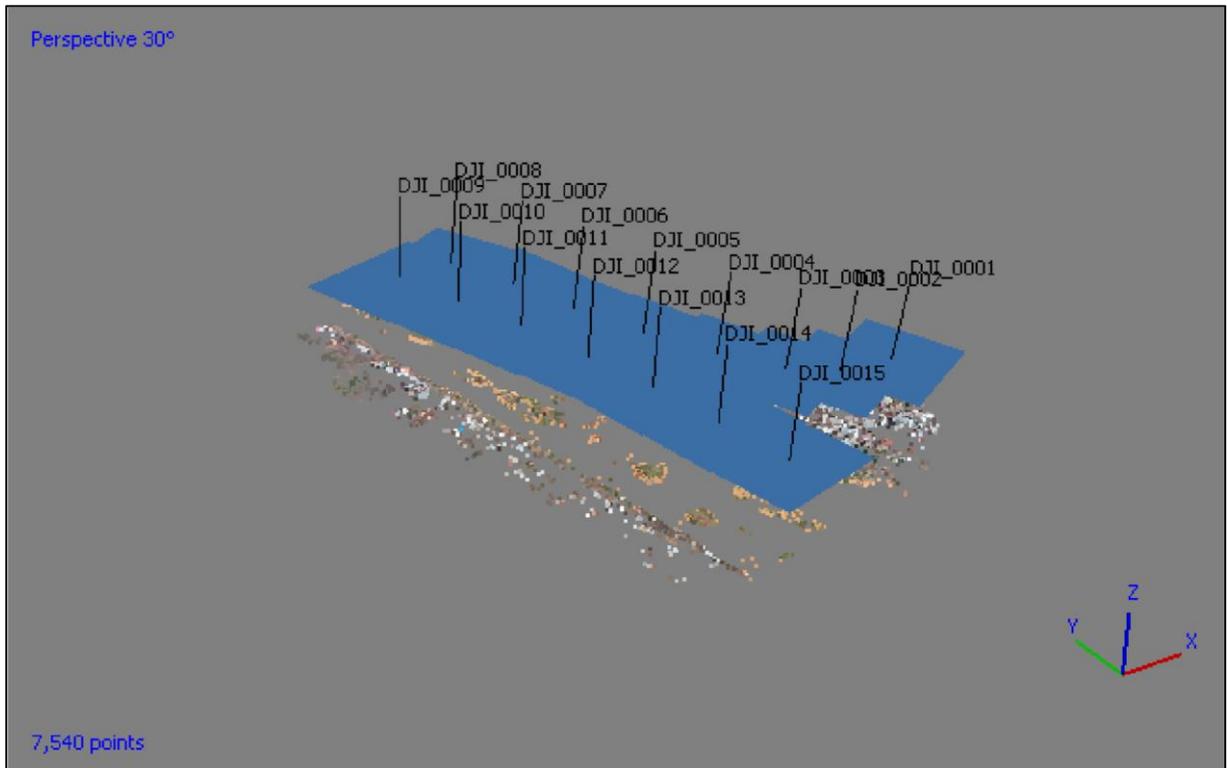


Figure 21: Alignement des photos sur photoscan

Par la suite, pour se projeter l'image dans le système de coordonnées Laborde Madagascar, il est nécessaire d'introduire des points d'appuis.

### 6.2.2 Points de contrôle

Ces points consistent à calculer chaque point sur les images dans le système de coordonnées dans l'espace. Contrairement aux points homologues les points de contrôle ne doivent pas forcément remplir les images. Leurs distributions peuvent être réparties de la façon suivante :

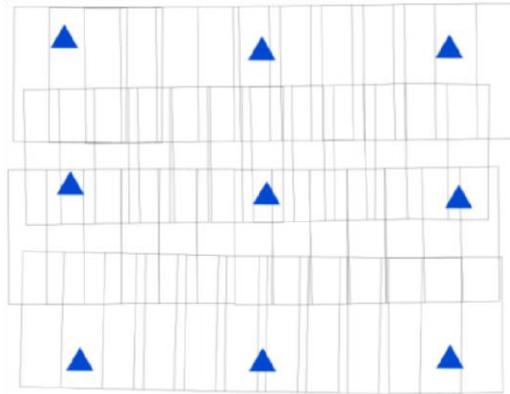


Figure 22: Représentation des emplacements des points de contrôle

Afin de positionner correctement les clichés, nous utilisons des points d'appuis localisés sur la zone par méthode topographique. Dans notre cas, ce sont des poteaux électriques, et leurs coordonnées sont obtenues à partir d'un GPS. Ils sont renseignés en position terrain et leur emplacement sur image est établi par pointage sur les différents clichés.

L'intérêt de construire cette grille en trois dimensions, c'est qu'à chaque repère, connu en coordonnées (X, Y, Z), que nous plaçons sur une photo, le logiciel va identifier le même point sur d'autres photos et placer un fanion bleu approximativement au même endroit. Voici comment les points sont représentés sur Photoscan :

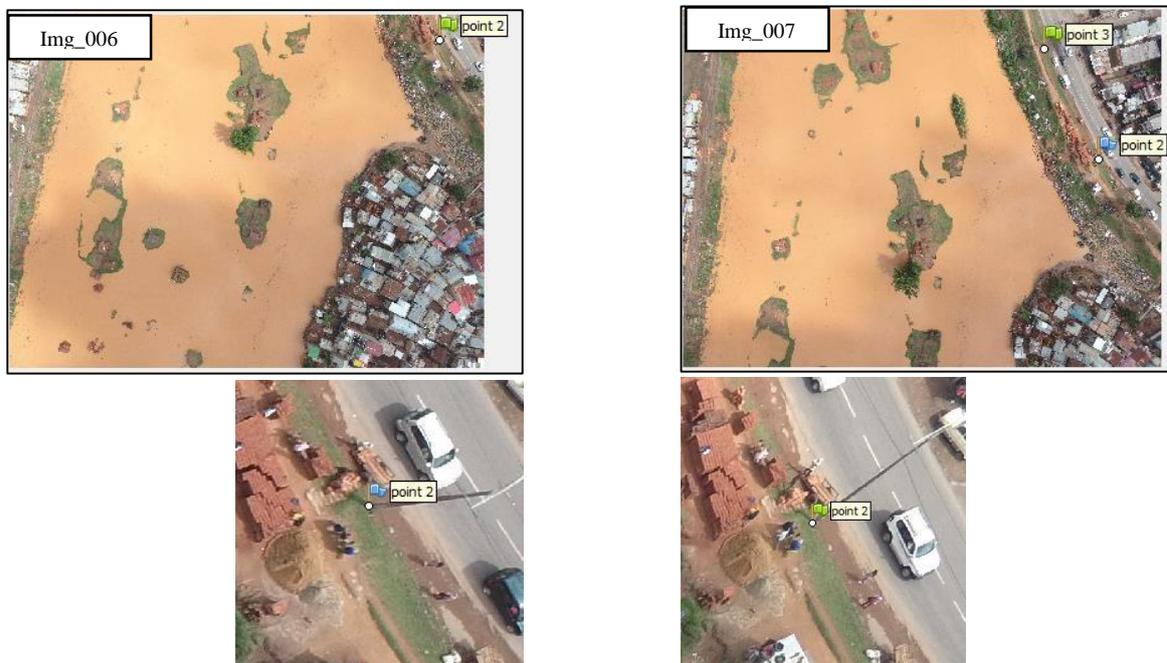


Figure 23: Représentation des points d'appuis sur Photoscan

Il suffit de déplacer manuellement le fanion bleu sur le point correspondant. Une fois que tous les points d'appui sont bien positionnés, il est important de bien calibrer les caméras en fonction de ces derniers. Si cette étape n'est pas faite, le logiciel va travailler avec



l'alignement initial des photos, et cela peut entraîner de grosse imprécision, pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres.

### 6.2.3 Aérotriangulation

Les cibles photogrammétriques renseignées permettent de réaliser l'aérotriangulation. Cet ajustement transforme directement les coordonnées images en coordonnées terrain, correspondant à l'orientation absolue des clichés. Le rapport d'aérotriangulation contient le détail des RMS (*Root Mean Square*) de l'erreur de projection et des distances aux rayons pour chaque point de contrôle.

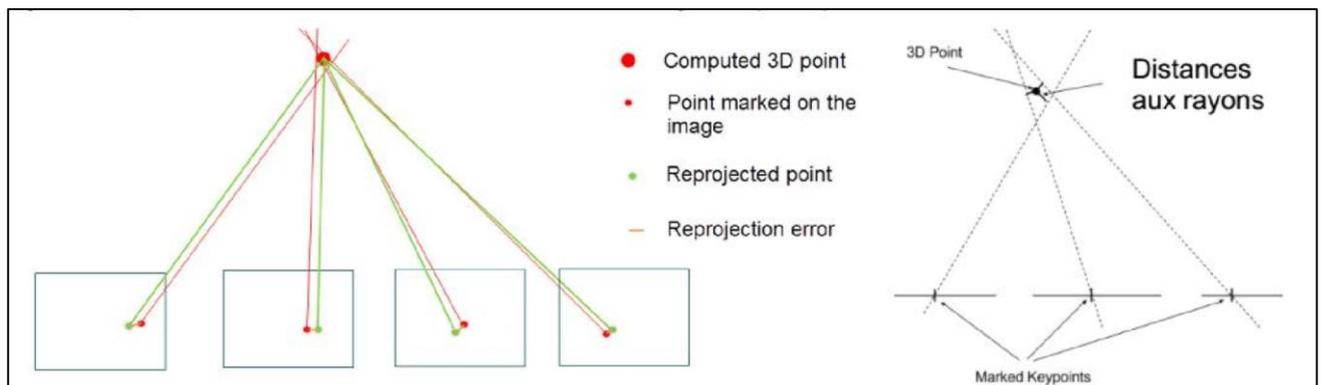


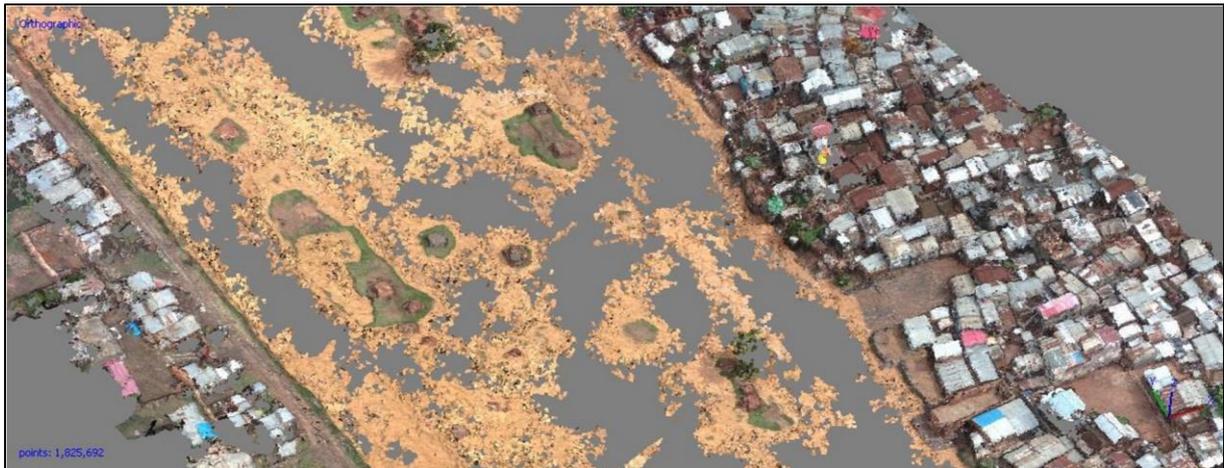
Figure 24: Erreur de reprojection et distances aux rayons

L'erreur de reprojection (Figure 24) correspond à la distance moyenne entre la position d'un point ajustée par moindres carrés et la position de ce point renseignée sur les différents clichés. Cette distance est exprimée en pixel en divisant la distance par le GSD moyen défini pour ce point. Lorsqu'un point est observé par un grand nombre de clichés, les rayons perspectifs identifiant sa position ne s'intersectent pas exactement en ce point. La RMS de distances aux rayons (Figure 24) exprime la moyenne des distances orthogonales séparant la position du point ajustée par moindres carrés et chacun des rayons perspectifs.

Notre reconstruction présente une RMS de l'erreur de reprojection de 0.110 pixels et une RMS de l'erreur des distances aux rayons de 0.026 m d'après l'ajustement par Photoscan (cf annexe B)

### 6.2.4 Productions

Enfin, maintenant que les points d'appuis ont été placés et que les positions caméra ont été optimisées, le calcul d'un nuage dense de point peut être lancé. Nous pouvons choisir la qualité du nuage, plus la qualité est haute, plus le MNS sera précis, en contrepartie, le temps de traitement peut être plus ou moins long suivant la dimension de la zone.



*Figure 25: Extrait du nuage dense de point*

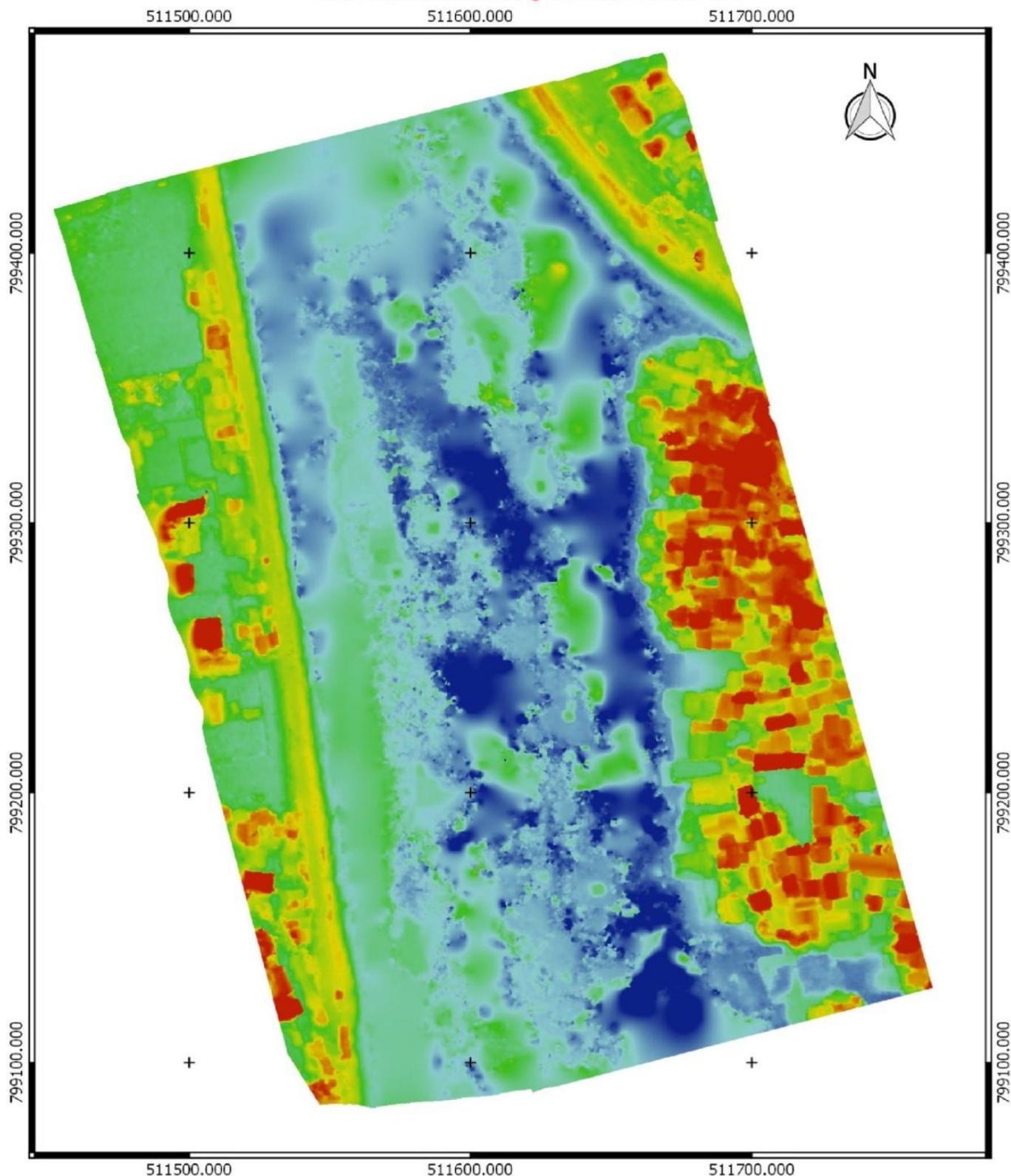
Une fois ces étapes successives réalisées, nous pouvons réaliser la production du modèle photogrammétrique tridimensionnel. La reconstruction de la zone est montrée à la Figure 26.

En plus de ce modèle tridimensionnel, il est possible de réaliser la production d'une orthophoto et du modèle numérique de surface permettant une visualisation et une analyse dans des logiciels SIG tels que QGIS ou ARCGIS.

Ainsi, au terme de cette étape, nous obtenons :

- Le MNE au format Geo-TIFF permettant l'analyse de la reconstruction sur le logiciel QGIS. La résolution de ces produits a été définie selon le GSD médian calculé lors de l'aérotriangulation, soit 4 cm/pixel.

# MODELE NUMERIQUE D'ELEVATION



**Légende**

Altitude

Blue	1234.700
Cyan	1236.785
Green	1238.870
Yellow	1240.955
Red	1243.040

Systeme de coordonnée : Laborde Madagascar

Carte réalisée par Anja RANDRIANANTENAINA  
le 30 Aout 2019

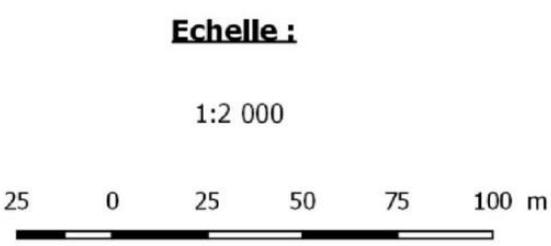


Figure 26 : Modèle Numérique d'Élévation



- Il faut extraire le MNT du MNS généré par le nuage dense. Pour cela, Agisoft Photoscan possède un algorithme de classification des points afin de classer ces derniers en deux catégories : le sol et le sursol. Le logiciel ne le fait pas tout seul, il faut lui renseigner trois paramètres qui lui permettront d'identifier les points que nous considérons faisant partie du sursol :

**Angle** : désigne la pente maximale du terrain naturel toléré avant d'être considéré comme faisant partie du sursol.

**Distance** : détermine la variation maximum de l'élévation du sol. Si à un endroit, il y a une variation suffisamment importante pour dépasser le seuil imposé par ce paramètre alors ce n'est pas considéré comme du relief, mais comme du sursol.

**Taille de la cellule** : doit être réglé en fonction de la taille de la plus grande zone où nous considérons qu'il n'y a pas de point au sol, mais que des points du sursol, par exemple des forêts, de grandes infrastructures, etc. Plus la taille de la cellule est petite plus les éléments du sursol seront considérés comme petit.

Pour qu'un élément du MNS soit classifié comme étant du sol, il faut qu'il accumule les trois conditions fixées par l'angle, la distance et la taille de la cellule (cf annexe A).

# MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

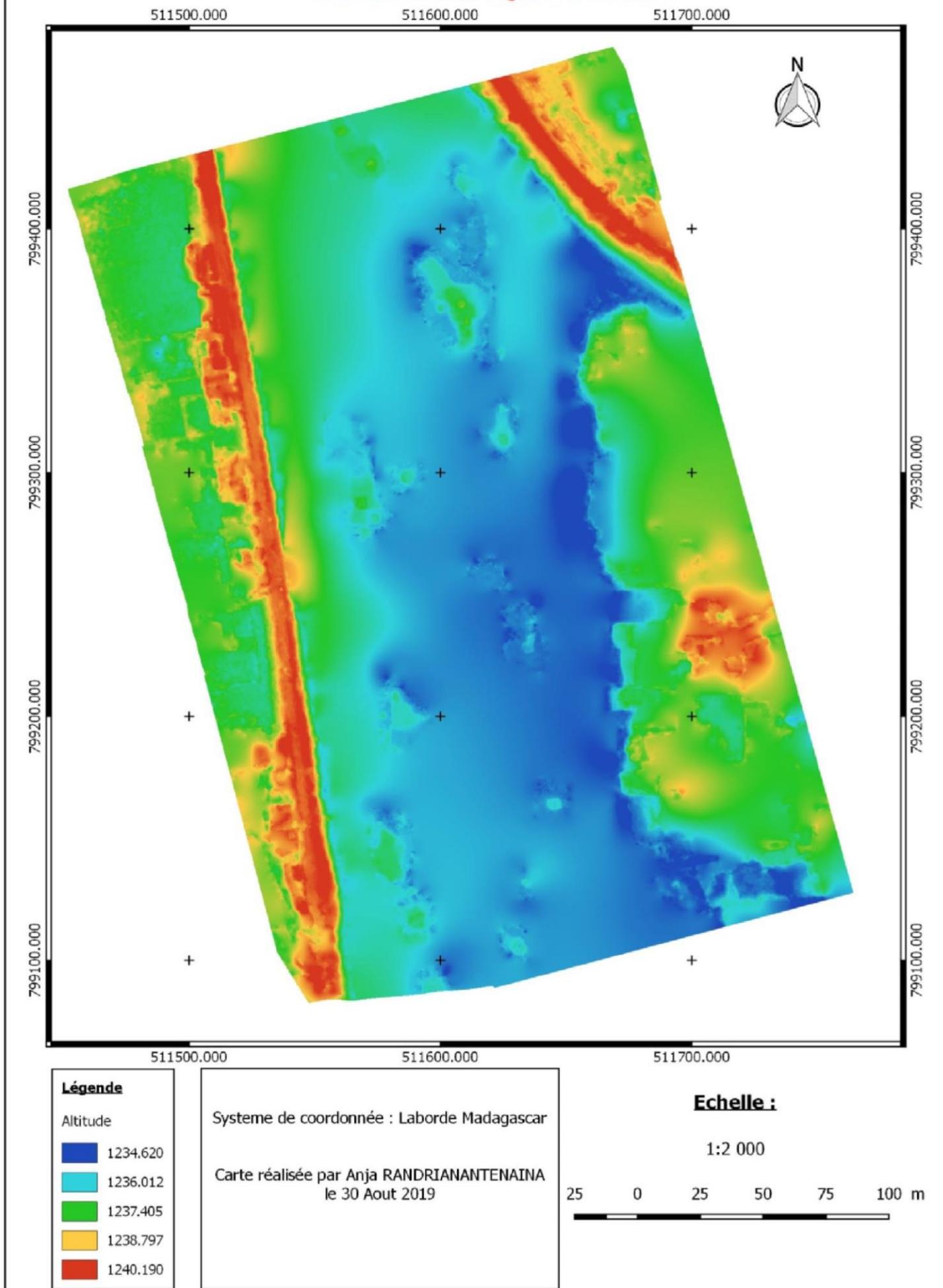


Figure 27 : Modèle Numérique de Terrain

# ORTHOPHOTO DE LA ZONE LEVEE PAR DRONE



Système de coordonnées : Projection Laborde de Madagascar

**Echelle :**

1:2 000

Carte réalisée par Anja RANDRIANANTENAINA  
le 30 Aout 2019

25 0 25 50 75 100 m



Figure 28 : L'Orthophoto



➤ Le modèle tridimensionnel

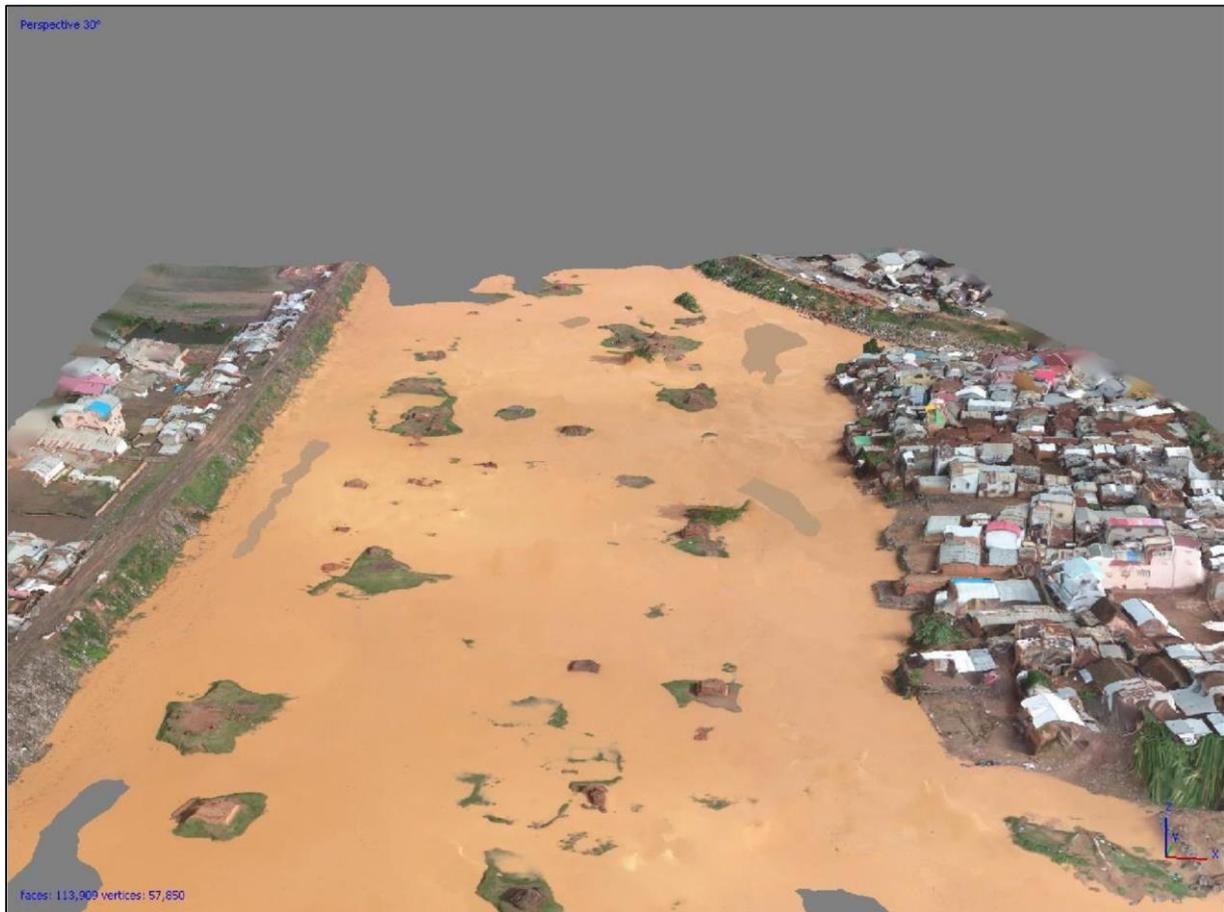


Figure 29: Reconstruction tridimensionnelle de la zone



## Partie

## III

# *Analyses et Réalisation de la simulation urbaine en 3D*

*Cette dernière partie concernera en premier lieu les analyses des résultats sur l'utilisation du drone et sur la reconstruction photogrammétrique. On évoquera ensuite la réalisation de la simulation urbaine en 3D ainsi l'étude budgétaire pour la conception.*



## **Chapitre 7 : ANALYSE DES RÉSULTATS**

Ce chapitre représente les résultats qui permettront de valider ou d'infirmier que les données fournies par le drone ont pour qualité suffisante dans le cadre d'une reconstruction photogrammétrique.

Pour rappel, la qualité des données utilisées lors d'une reconstruction photogrammétrique d'un objet est définie par :

- la maîtrise du drone ;
- la qualité des images ;
- la qualité de la reconstruction.

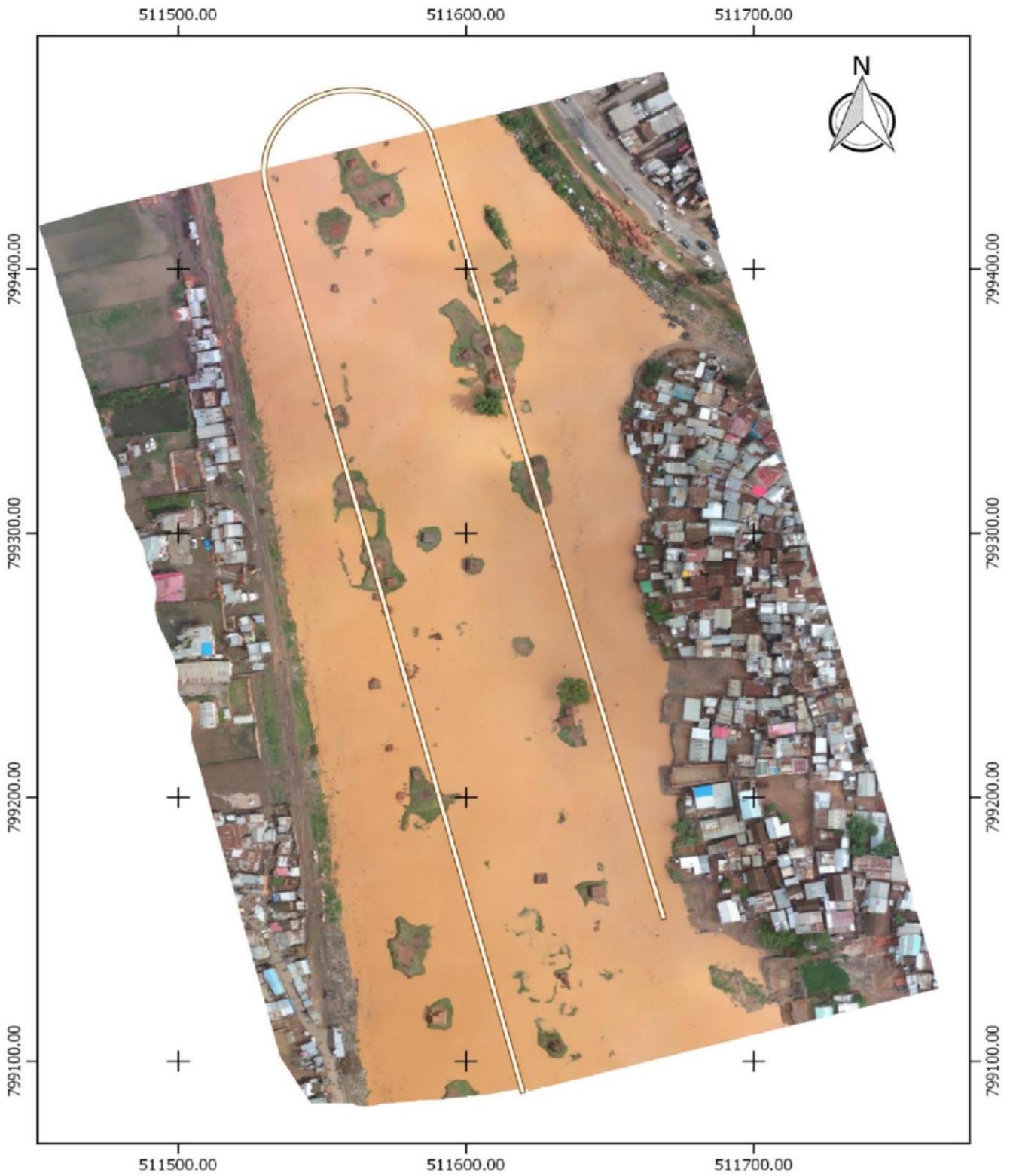
### **7.1 La maîtrise du drone**

#### **7.1.1 La trajectoire**

La trajectoire suivie par le drone a été élaborée en tentant de respecter le « plan d'acquisition idéal dans un cas général » de reconstruction photogrammétrique.

Concernant la zone, survolée à l'aide de l'option *way-point*, le dessin de la trajectoire suivie à l'aide de points de passage s'est effectué sur le terrain. Les repères visuels extérieurs ont permis de réaliser un parcours proche du plan théorique.

# Trajectoire du drone



## Légende

— ligne de vol

Système de coordonnées : Laborde Madagascar

Carte réalisée par Anja Randrianantenaina le  
30 Aout 2019

## Echelle :

1:2 000

25 0 25 50 75 100 m

Figure 30 : Trajectoire du drone



### 7.1.2 Prise des clichés

Les clichés effectués par le drone peuvent être enregistrés à une fréquence donnée de manière automatique durant le vol et plus particulièrement lors d'un vol suivant une mission *way-point* (cf annexe D). Cette automatisation du procédé de prises de vue permet d'affirmer que nous avons maîtrisé la prise de clichés dans la zone à lever.

#### 7.1.2.1 *Position des photos*

Le rapport de qualité fourni lors de l'aérottriangulation donne la position calculée des clichés lors de l'ajustement et l'incertitude liée à ce positionnement.

Cette position permet d'analyser la distance de correction entre cette position ajustée et celle fournie par les métadonnées des clichés, qui est celle mesurée par le GPS à bord du drone.

Le Tableau ci-dessous reprend les valeurs caractéristiques de l'incertitude de positionnement des clichés :

Clichés	Incertitude de positionnement [m]		
	X	Y	Z
DJI_0001.JPG	0.013508	0.016318	-0.015803
DJI_0002.JPG	-0.067650	-0.009765	-0.158853
DJI_0003.JPG	-0.095062	0.074326	-0.039546
DJI_0004.JPG	0.020512	-0.000177	0.159179
DJI_0005.JPG	0.021455	-0.041309	0.152117
DJI_0006.JPG	0.035144	-0.052343	0.147596
DJI_0007.JPG	0.124865	-0.053517	0.071071
DJI_0008.JPG	0.044283	0.016024	0.170938
DJI_0009.JPG	0.048171	0.037493	-0.072735
DJI_0010.JPG	0.005242	0.037969	-0.267626
DJI_0011.JPG	-0.009226	0.015350	-0.170008
DJI_0012.JPG	0.015426	-0.025123	-0.111248
DJI_0013.JPG	0.011782	-0.051715	-0.053033
DJI_0014.JPG	-0.013665	-0.043128	0.097932
DJI_0015.JPG	-0.003684	-0.023284	0.086846
<b>Erreur totale</b>	<b>0.049312</b>	<b>0.038509</b>	<b>0.134094</b>



Tableau 5: Paramètres liés au positionnement des clichés après aérotriangulation

## 7.1.2.2 Précision de l'appareil photo

Le rapport de qualité fourni lors de l'aérotriangulation donne les paramètres de calibration de la caméra après l'ajustement.

Le Tableau ci-dessous reprend ces paramètres :

Distance focale [mm]	Distance focale équivalent à 35mm [mm]	Point principal X [Pixels]	Point principal Y [Pixels]
3.61	20	1998.90	1500.95
B1	P1	P2	
0.0025	-0.0038	0.0033	

Tableau 6: Paramètres de calibration de la caméra

Avec:

B1 : coefficients de distorsion radiale

P1 et P2 : coefficients de distorsion tangentielle

La position du point principal doit normalement se trouver au centre du capteur, à savoir aux coordonnées image (2000 ; 1500). Dans notre cas, on remarque que cette position diffère de 1.1 et de 0.95 pixels.

Pour pouvoir détailler l'importance des distorsions créées par les paramètres repris dans ce tableau, une représentation géométrique des déformations spatiales en fonction de la distance du point principal serait utile. Le rapport de qualité reprend une grille représentant ces déformations. Cependant, l'épaisseur des traits du grillage rend toute analyse impossible.

## 7.2 Qualité des images

Le drone délivre des images plus précises et détaillées et est complémentaire à une captation par satellite ou avion. Les photos aériennes ainsi captées à l'aide d'un drone, permettent d'effectuer des mesures comme sur une carte standard. Réalisées à basse altitude, ces prises de vue aérienne sont d'une précision directement proportionnelle à la résolution de l'image prise par l'appareil photo numérique embarqué. La résolution de l'appareil photo intégré dans le Phantom 4 est de 20 mégapixels permettant ainsi d'obtenir une qualité d'image



excellente malgré la hauteur de vol de plus de 100 mètres (par rapport au point de départ de l'appareil). Cela constitue un des avantages principaux de ce drone dans la mesure où elle permet d'obtenir des photos mêmes dans des zones inaccessibles (ou dangereux d'accès).

Aussi, en termes d'input de traitement, les images prises par drone sont telles que les données importantes notamment les sursols, les contours des maisons, etc. sont parfaitement visibles.

Pour rappel, le GSD correspond à la distance au sol séparant le centre de deux pixels jointifs et définit la densité de l'échantillonnage radiométrique au sol dépend, entre autres, de la hauteur de vol. Dans notre cas, c'est de 2.81 cm/pixel, cette valeur est classifiée parmi les hautes résolutions de l'imagerie aérienne.

De ce fait, la qualité des résultats finaux est également proportionnelle à celle des images traitées.

### 7.3 Caractéristiques de la reconstruction

Les résultats fournis par le logiciel permettant d'analyser la reconstruction s'avèrent être peu nombreux et dont l'utilité est discutable.

Les documents contenant ces informations qualitatives sont les rapports d'aérotriangulation, de qualité et des photos. Ces différents rapports contiennent un nombre important de cartes représentant spatialement l'erreur mais des tableaux permettant d'effectuer des analyses statistiques de ces erreurs seraient beaucoup plus utiles pour analyser la qualité de notre travail.

Le rapport de l'aérotriangulation repris à l'annexe B contient une information concernant la précision de la reconstruction en chaque point homologue.

<b>Points homologues générés</b>				
<i>Nombre de points</i>	<i>Nombre de photos par point</i> (médiane)	<i>Nombre de points par photo</i> (Médiane)	<i>Erreur de reprojection</i> [Pixels]	<i>Distances aux rayons</i> [m]
1824	3	438	0.110	0.026

Tableau 7: Précision du modèle reconstruit



Concernant la validation du modèle tridimensionnel, celle-ci s'opère en mesurant les écarts entre les positions modélisées par la reconstruction et les positions obtenues par mesure GPS des cibles de validations.

Écarts de reconstruction		
<i>X [m]</i>	<i>Y [m]</i>	<i>Z [m]</i>
0.087	0.053	0.040

Tableau 8: Écarts de la reconstruction

En effet, ils ont été obtenus sur un petit échantillon composé de 3 points répartis sur la zone. Ils permettent simplement d'évaluer les écarts de façon ponctuelle en ces différents points mais, par manque de représentativité spatiale, ne permettent pas d'autres conclusions quant à l'exactitude de la reconstruction. Les résultats ci-dessus dépendent de la qualité des données et de l'efficacité de l'algorithme lors de la réalisation de la reconstruction photogrammétrique. De la même manière que pour les rapports de qualité, les développeurs du logiciel ne fournissent que peu d'information concernant le fonctionnement du logiciel. Outre le fait qu'il utilise l'algorithme SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform* = transformation de caractéristiques visuelles invariantes à l'échelle), aucune autre information n'est disponible concernant son fonctionnement pour l'identification des points homologues.

### 7.3.1 Homogénéité spatiale

La procédure de reconstruction tridimensionnelle réalisée par le logiciel a identifié 1824 points homologues. L'homogénéité spatiale de la qualité de la reconstruction peut être analysée de plusieurs manières. Le rapport de l'aérotriangulation fournit une information quant au nombre de photos observant un même point homologue détecté ainsi que l'incertitude sur la détermination de la position de ces points homologues. La répartition et la variation spatiale de cette incertitude permet de contrôler l'homogénéité spatiale de l'erreur de la reconstruction.

#### Précision de la position des points homologues :

Imprécision de la position [m]		
<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
0.019	0.042	0.062

Tableau 9: Imprécision de la position des points homologues

Les cartes réalisées par le logiciel lors de l'aérotriangulation, présentées à la ci-dessous, montrent la variation spatiale de cette imprécision :

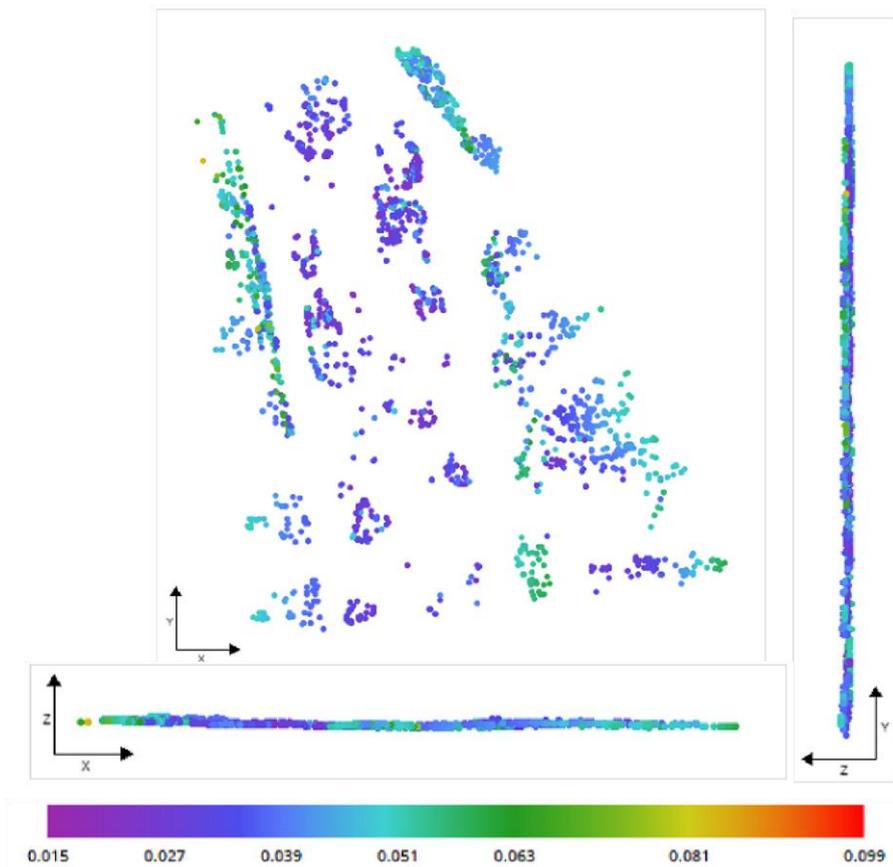


Figure 31: Incertitude de positionnement des points homologues identifiés lors de la reconstruction.

On peut remarquer que la majorité de la zone est de couleur bleue – mauve, représentant une imprécision égale ou inférieure à l'imprécision moyenne reprise dans le Tableau 9.

#### Nombre de photos observant un point homologue

Nombre de photos observant un point homologue		
<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
3	5	8

Tableau 10: Nombre de photos observant un même point homologue

Les cartes réalisées par le logiciel lors de l'aérotriangulation, présentées à la figure cidessous montrent le nombre de photos observant un même point homologue :

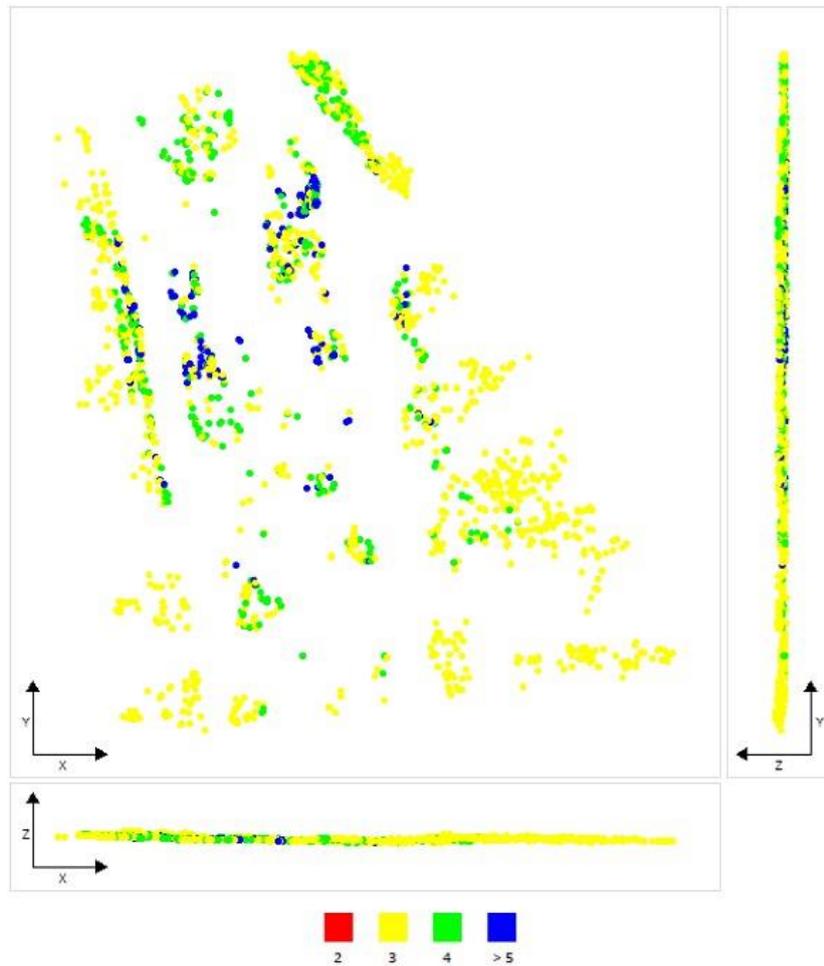


Figure 32: Nombre de photos identifiant un point homologue identifié lors de la reconstruction

On peut remarquer que la partie au centre de la zone levée sont majoritairement représentés en bleu, soit 5 photos ou plus observant un même point. Le pourtour ainsi qu'une partie située dans la partie basse sont d'avantages représentés en jaune et en vert, soit un même point observé par 3 ou 4 photos.

Notons que comme le montre le Tableau 10, le minimum de photos observant un point homologue est de 3. Cela permet de vérifier que l'on suit les recommandations relatives aux prises de vue fournies par le logiciel.



## **Chapitre 8 : CONCEPTION DE LA SIMULATION URBAINE**

Dans ce chapitre, on procède à réaliser la conception de la simulation urbaine en 3D. Il faut connaître en premier lieu les éléments à aménager, ensuite on procédera à l'analyse et la détection de ces éléments à partir des données géographiques élaboré afin de réaliser enfin la simulation.

### **8.1 Les éléments à aménager**

Dans une étude d'amélioration d'espace urbain, les éléments les plus importants sont les bâtiments. Parmi ces bâtiments, plusieurs constructions sur la zone sont apparues irrespect de règles imposées par le code de l'urbanisme et de l'habitat, ce sont :

- Les constructions illicites.
- Les constructions implantées dans les zones risquées par l'inondation.
- Les habitats en problème d'ensoleillement lié aux espacements et la hauteur.

### **8.2 Détection des éléments à aménager**

Nous réalisons la détection, mais aussi l'analyse des modifications par apparition ou par disparition d'éléments qui sont irrespects des règles imposés ci-dessus à partir du Photoscan même.

La méthode proposée exploite une carte d'évidences 3D et des fonctions cognitives de similarité à partir des données géographiques qu'on a été élaborés à la fin du traitement photogrammétrique.

#### **8.2.1 Détection des constructions illicites**

En visualisant le modèle 3D élaboré, les constructions détectées et vectorisées sont définies illicites si elles ont des caractéristiques parmi les critères suivants :

- Construction légère (mur en bois, en tôle, ...)
- Ancienneté de construction (risqué d'un effondrement)
- Structure non-respect de la norme architecturale (dimensionnement)

Grace à la bonne résolution et la bonne qualité de la reconstruction tridimensionnelle, nous ne pourrons pas avoir des difficultés pour la visualisation des constructions concernées à ces critères.



La figure suivante indique cette détection par vectorisation :

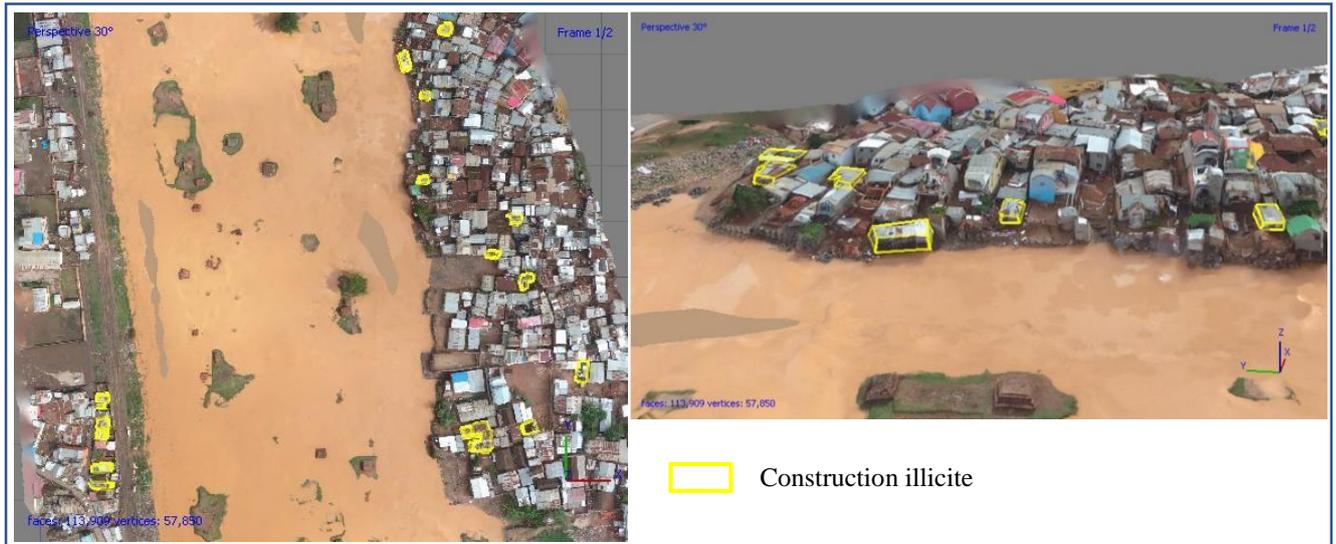


Figure 33: Visualisation des constructions illicites sur Photoscan

D'après la détection, on constate que 18 bâtiments reparties dans la zone sont définis illicites que ceux soient elles sont légères, anciennes ou irrespects de la norme architecturale.

### 8.2.2 Détection des constructions à risque d'inondation

Rappelons que notre zone d'étude est traversée par le fleuve d'Ikopa. Tout d'abord, il faut tenir compte à la variation du niveau d'altitude de cette rivière pour délimiter les zones souvent inondées.

On prend comme référence la pluviométrie et la hauteur d'eau du service APIPA pour étudier la délimitation. D'après les données du service APIPA, entre l'année 2000 et 2019, le débit du fleuve d'Ikopa atteignait le maximum en année 2007-2008(cf annexe C), dont le mois de janvier est le mois le plus saison pluviométrique dans cette tranche d'année. La valeur maximale des hauteurs d'eau du niveau de la station d'Anosizato atteint une valeur environ à 1243 m.

Pour mieux détecter les constructions compris dans la zone risquée par l'inondation, on va utiliser toutes les données d'altitude due au levé photogrammétrique comme les courbes de niveau.

Évidemment que ce sont les habitats implantés au bord du fleuve ; à l'altitude inférieur à la valeur maximale des hauteurs d'eau indiqué ci-dessus.

La figure ci-après indique cette délimitation y compris les bâtiments risqués :

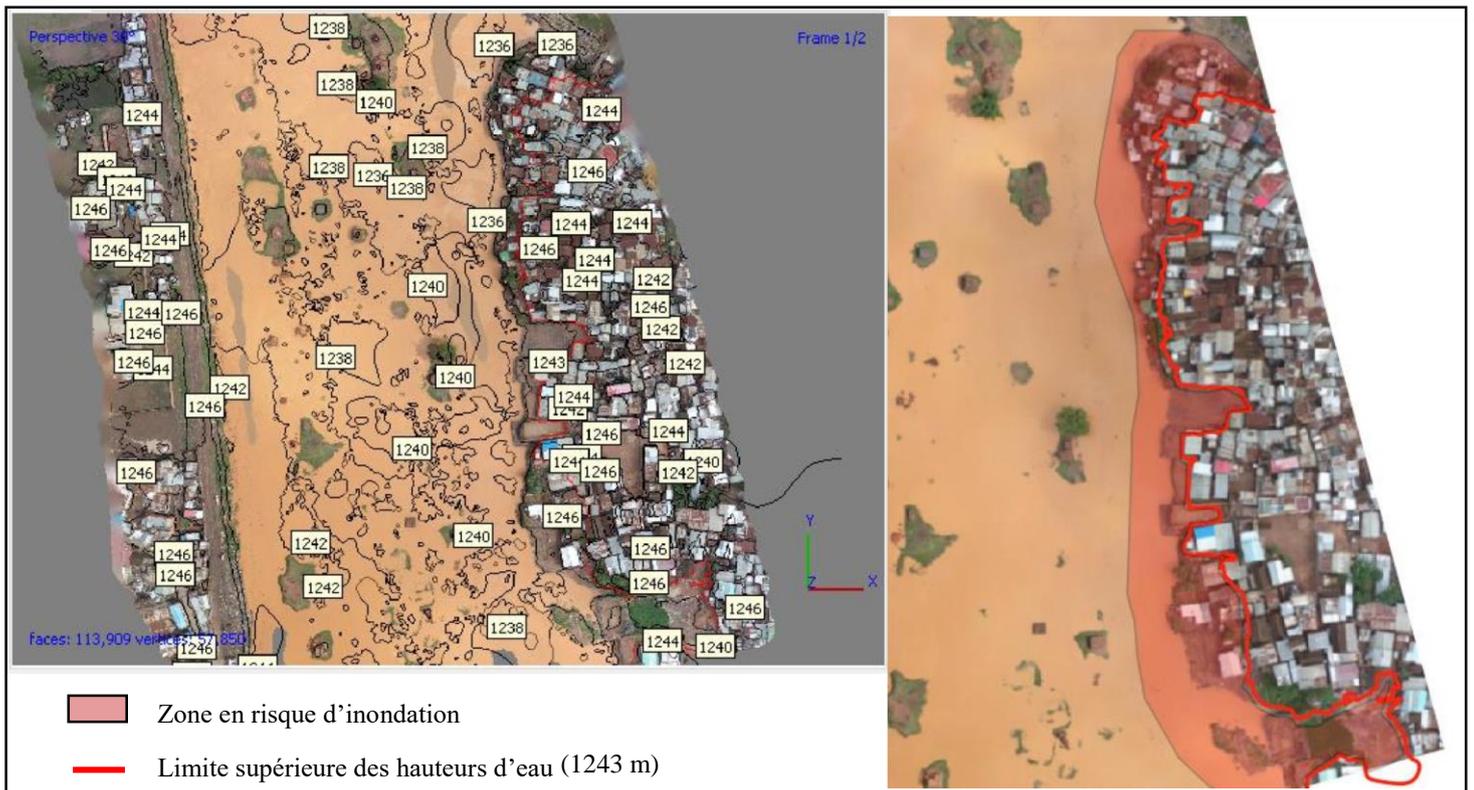


Figure 34: Détection des habitats en risque d'inondation sur Photoscan

D'après l'analyse, 47 bâtiments sont trouvés implantés sur une surface de 3 478 m<sup>2</sup> risquée par l'inondation.

### 8.2.3 Condition d'ensoleillement des bâtiments

Précisant que la condition d'ensoleillement des bâtiments se définit par la combinaison de l'espacement et la hauteur de ces habitats implantés cote à cote.

Pour favoriser le besoin d'une certaine espace individuelle, un espace d'au moins quatre mètres de largeur devront imposer entre deux bâtiments comme indique le code de l'urbanisme et de l'habitat. Mais, cette distance pourra être ramenée ainsi à deux mètres si aucune ouverture de pièces d'habitations n'y prend le jour.

En visualisant notre zone d'étude en un seul coup d'œil, cet espacement n'était pas respecté. Les constructions sont trop serrées et celles-ci provoquent la salubrité de l'environnement dans la zone même.

Notre méthode de mesure se fait en traçant un profil choisi qui coupe certain bâtiment en succession pour déterminer la hauteur et cet espacement.

Voici un extrait de mesure de cet espacement sur Photoscan en utilisant le MNE :

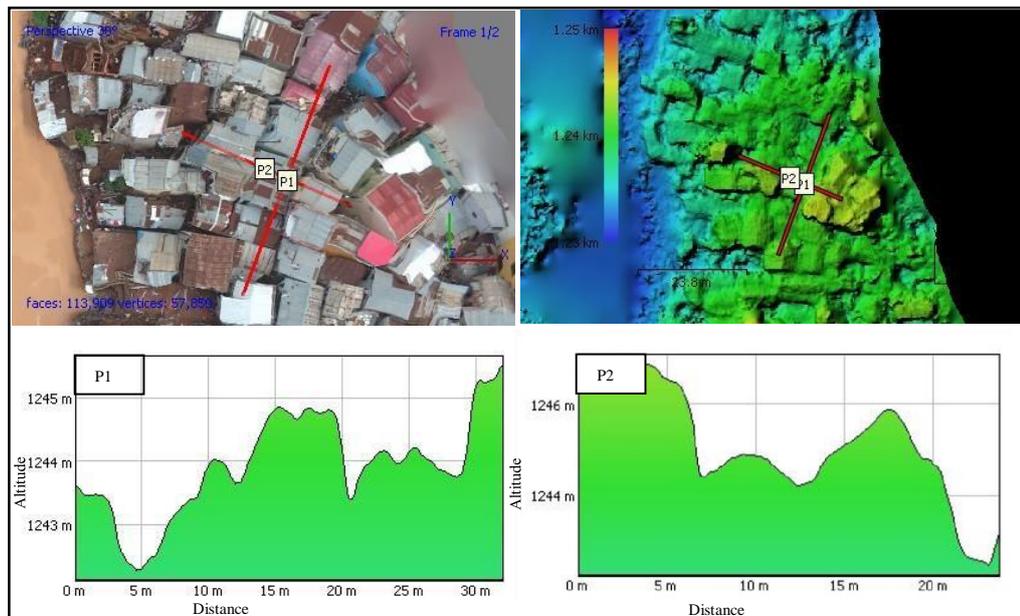


Figure 35: Extrait de profilage des habitats implantés côte à côte

En traçant plusieurs profils partout la zone, on a constaté que la plupart des habitats n'ont pas respectées l'espacement imposé par la règle d'urbanisme et de l'habitat, et en plus combiné à la hauteur des bâtiments, presque tous les habitats implantés au centre n'ont pas bénéficié cette condition d'ensoleillement.

### 8.3 Réalisation en 3D de la zone améliorée

Avant de réaliser la simulation, on constate après la visualisation en 3D que la surface bâtie dans la zone levée est de 15 638 m<sup>2</sup> sur laquelle comporte 207 ménages qui sont classés selon leur niveau comme suit :

- RDC : 169
- RDC + 1 : 33
- RDC + 2 : 5

L'analyse après tous les détections nous mènent à imposer que presque la totalité des constructions dans la zone n'ont pas respecté la règle d'urbanisme et de l'habitat ; cela implique que la zone actuelle est totalement mal urbanisée.

Les suivants sont les éléments à modifier pour que la zone soit en respect des règles d'urbanisme et de l'habitat :

- Élimination de toutes les 18 constructions illicites et les 47 constructions implantées sur le bord du fleuve risquées d'une inondation en rendant la zone en espace verte.
- Réorganisation totale de tous les bâtiments en respectant l'espacement et l'ensoleillement.



### 8.3.1 Proposition d'amélioration de la zone

Face aux éliminations et à la réorganisation des bâtiments, il est sûr que le nombre des bâtiments sur la zone actuelle sera réduire peut-être jusqu'à la moitié après l'amélioration. Cela entraîne une présence des sans-abris.

Pour éviter alors à cette circonstance, nous avons proposé de choisir à construire des bâtiments identiques de type R+1 et de dimension 4m×6m×6m ; comportant chacun 2 ménages différents. Ces bâtiments seront implantés comme indique la figure ci-dessous en tenant compte de la condition d'ensoleillement :

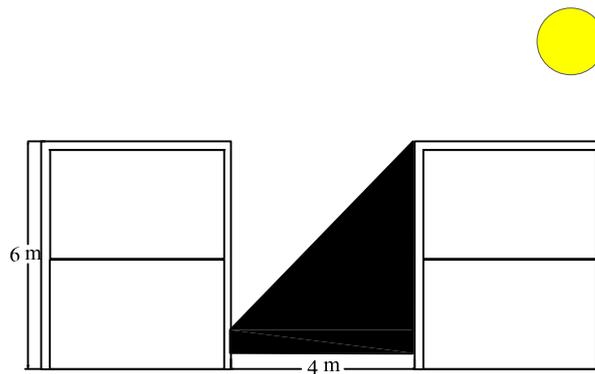


Figure 36: Condition d'ensoleillement des habitats

Donc sur la zone constructible de 12 160 m<sup>2</sup>, avec la dimension de ce type de bâtiment, on pourra implanter 105 bâtiments en respectant l'espacement et cette condition d'ensoleillement.

Et en résulte que ces bâtiments peuvent accueillir 210 ménages qui se correspondent à l'effectif des habitats actuels.

Apart tous, d'autres éléments doivent rajouter pour se rendre à l'urbanisation de la zone :

- Voie d'accès : c'est exigé par la règle d'urbanisme en termes d'aider les habitants à se servir entre eux.
- Espaces verts : même que préservation de la nature, nous les choisissons ainsi comme solution pour occuper la zone délaissée par les habitats éliminés sur le bord de la rivière.

Vu que la surface constructible n'est que 12 160 m<sup>2</sup>, il est obligé de garder la zone en zone d'habitation. Donc l'idée d'introduire d'autres éléments ou de la partager avec d'autre type d'occupation n'est plus exécutable. Les habitants de la zone doivent joindre dans les zones approximatives pour accéder d'autres activités.



Pour que la réalisation du modèle 3D de la zone améliorée soit à terme, on a choisi le logiciel Autocad civil 3D en introduisant et modifiant le modèle 3D de la zone actuelle.

D'après toutes les modifications, la zone deviendra comme indique le plan ci-dessous :



PLAN DE LA ZONE AMÉLIOREE



Figure 37: Plan en 3D de la zone améliorée



### 8.3.2 Evaluation après l'amélioration

Après que l'amélioration de cet espace urbain est réalisée, la structure urbaine ou le tissu urbain sera bien lisible contrairement à l'image de la zone actuelle.

Les constructions sont identiques et bien organisées vis à vis leur implantation, sans risque d'inonder et même peut se servir entre eux par des voies d'accès. Tous ces bâtiments seront construits sur une surface de 12 160 m<sup>2</sup> tandis que la surface bâtie dans la zone actuelle est de 15 638 m<sup>2</sup>.

Par rapport à l'espace trop serré actuelle, cette étude d'amélioration rend ainsi la zone en espace viable et bénéficie la condition d'ensoleillement pour chaque bâtiment.

En plus, grâce à l'implantation des espaces verts, la préservation de la nature et la condition environnementale en générale assure également cette étude d'amélioration d'espace urbain.

Le tableau suivant illustre la comparaison entre l'état de la zone avant et après l'amélioration



	Avant l'amélioration	Après l'amélioration
Modèle 3D		
Nombre totale des bâtiments	207	105
Effectif des bâtiments selon leur niveau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- RDC +2 : 5</li> <li>- RDC +1 : 33</li> <li>- RDC : 169</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- RDC + 1 (4m×6m×6m) pour 2 ménages : 105</li> </ul>
Surface bâties	15 638 m <sup>2</sup>	12 160 m <sup>2</sup>
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espace trop serrée - Voie d'accès indéfinie</li> <li>- Bidonville</li> <li>- Salubre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espace viable</li> <li>- Accessible</li> <li>- Structure urbaine bien définie</li> <li>- Présence d'espace vert</li> </ul>

Tableau 11: Tableau comparatif avant et après l'amélioration



## **Chapitre 9 : RECOMMANDATIONS ET COÛTS**

Ce dernier chapitre renseigne quelques tâches qu'on doit tenir compte pour que la mission soit bien déroulée. Évoquons-y le guide d'utilisation du drone et le coût estimatif de la conception.

### **9.1 Guide d'utilisation du drone**

Le premier paramètre utile pour le vol photogrammétrique est le réglage des « trims ». Les trims sont des commandes permettant d'ajuster l'attitude et les réactions du drone en vol. Il y en a 4, un pour chaque déplacement possible prévu (déplacements horizontaux selon X et Y, déplacement vertical selon Z et rotation autour de Z). Un bon réglage des trims consiste à ce que le drone en vol ne se déplace pas sans l'intervention du pilote sur les manettes de la radiocommande. Concrètement, ce réglage agit comme un compensateur sur les moteurs des hélices qui tourneront plus ou moins vite les unes par rapport aux autres, et ajusteront ainsi les déplacements du drone.

Après ce réglage, l'étape de pilotage du drone se déroule comme suit :

- Position de l'appareil sur une surface plane et dégagée, les indicateurs de batterie bien en vue.
- Mettre la radiocommande et l'appareil mobile sous tension puis allumez la batterie de vol intelligent.
- Lancement de l'application Pix4D, puis ouvrez la page Caméra.
- Ensuite, préparer le plan de vol issu de l'application en intégrant les paramètres de vol (la ligne de vol, la hauteur de vol, le point de départ et la fin du vol, les taux de recouvrement photo, le mode de capture des photos).
- Patientez jusqu'à ce que les indicateurs de l'appareil clignotent en vert. Cela signifie que le point de départ est enregistré et que le vol peut être effectué en toute sécurité. S'ils clignotent en jaune, cela signifie que le point de départ n'a pas été enregistré.
- En cliquant sur le bouton « start », le drone décollera et suivra le trajet fixé selon la ligne de vol.
- Après l'atterrissage, exécutez la commande CSC ou maintenez le manche gauche dans sa position la plus basse jusqu'à ce que les moteurs soient coupés.



- Enfin, mettez la batterie de vol intelligente hors tension en premier, puis éteignez la radiocommande.

## 9.2 Coût estimatif du projet

Ce coût estimatif du projet concerne toutes les charges relatives aux travaux photogrammétriques, les traitements des données jusqu'à la réalisation de l'amélioration de la zone.

### 9.2.1 Coût des ressources humaines durant l'étude du projet

Le coût estimatif des ressources humaines concerne les indemnités allouées aux techniciens d'étude.

Désignation	Quantités	Prix Unitaire [Ar]	Temps d'exécution [Jours]	Montant total [Ar]
Ingénieur Photogrammètre	1	150 000	3	450 000
Assistant (PVA)	1	50 000	1	50 000
Dessinateur	1	20 000	3	60 000
Sigiste	1	40 000	3	120 000
<b>COÛT TOTAL DES RESSOURCES HUMAINES</b>				<b>680 000</b>

Tableau 12: Coût estimatif des ressources humaines durant l'étude du projet



## 9.2.2 Coût des matériels utilisés et autres

Désignation	Quantités	Prix Unitaire [Ar]	Temps d'exécution [Jours]	Montant total [Ar]
<b>Matériels</b>				
Location du Drone	1	200 000	1	200 000
GPS	1	20 000	1	20 000
Ordinateur portable	2	200 000	3	1 200 000
<b>Autres</b>				
Transports	Forfaitaire	60 000	1	60 000
<b>COÛT TOTAL</b>				<b>1 480 000</b>

Tableau 13: Coût des matériels utilisés et autres

D'après ces tableaux, le coût total de la réalisation du projet est estimé à **deux million cent soixante mille Ariary (2 160 000 Ar)**.



## Conclusion

Arrivés à la fin de ce mémoire, nous pouvons effectuer un retour sur les problèmes posés et les objectifs atteints.

L'étude menée dans ce travail s'est articulée autour du thème de la modélisation, de la précision et des mesures qui peuvent être effectuées à partir d'images, au niveau de la localisation d'entités dans les images et de mesures tridimensionnelles d'objets ou de scènes urbaines afin d'étudier l'amélioration de l'espace urbain. Les photos numériques issues des UAV subissent trois opérations pour corriger les erreurs de prise de vue ou inhérentes au relief, pour redresser leurs géométries et que chaque point soit géoréférencé dans un espace tridimensionnel obtenant un plan en 3D précis.

De ce fait, sur ce travail, nous nous sommes proposé d'apporter à notre étude en première partie d'imprégner les généralités sur les concepts clés. Après, l'acquisition des données de base sur terrain est réalisée en plusieurs étapes méthodiques ayant pour objectifs principaux de prendre des clichés photographiques par prise de vue aérienne par drone puis de lever par GPS les coordonnées de géoréférencement. Étant une phase principale dans la démarche, de la qualité des informations collectées sur terrain dépendront le modèle 3D obtenus à la fin pour mieux analyser la scène urbaine. Le traitement sur bureau consiste par la suite à effectuer les principes et processus de la reconstruction tridimensionnelle à partir des photos prises. Traitées sur Agisoft PhotoScan, les images sont alignées puis géoréférencées. Une densification du nuage de points et une reconstruction du modèle maillé permettront de réaliser le modèle 3D et les modèles numériques.

À la dernière partie, une analyse qualitative des résultats obtenus permettra de mettre en évidence la validation en termes de précision du plan 3D de la zone actuelle et de ses produits dérivés acquis selon la méthode des drones. À partir de ces produits, la détection et l'analyse des propriétés environnementales des constructions et des espaces urbains produisent les modifications dans la scène urbaine actuelle en matière de concerter autour de ces enjeux dans ce projet d'amélioration.

On résulte ici fin que c'est presque la totalité 100% de la zone nécessite une amélioration en respectant les règles imposées par le code de l'urbanisme et de l'habitat. Ainsi, c'est à l'égard de la condition d'ensoleillement que l'étude nous à énumérer une réduction de nombre des bâtiments identiques jusqu'à 105 nouveaux habitable pour 2 ménages différent de type R+1 et de dimension 4m×6m×6m par rapport aux 207 anciens dont 5 R+2, 33 R+1 et 169 RDC. Ces



nouveaux bâtiments se réparties sur une surface de 12 160m<sup>2</sup> tandis que l'avant sur 15 638 m<sup>2</sup>. Cette modification définit la structure urbaine de la zone en satisfaisant les habitants sur le plan environnemental et social.

Nous pouvons affirmer ici fin avoir obtenu des résultats plutôt satisfaisants, en particulier en ce qui concerne la détection de bâtiments, qui sont les éléments urbains les plus importants. Avec la surface assez vaste, l'étude d'amélioration n'est pas possible de s'avérer à introduire d'autre zone appart l'habitation Par ailleurs, le modèle de données 3D peut être étendu de manière à étudier d'autre application élargie comme suivi de l'urbanisation, étude de fiscalité, étude de l'assainissement par rapport à la rivière etc... La reconstruction 3D de ces détails a donné une assez bonne représentation, mais la photogrammétrie reste assez limitée quant à la précision du modèle 3D, par rapport à certaines méthodes plus coûteuses comme la lasergrammétrie qui permet par exemple une précision au centimètre près.



## BIBLIOGRAPHIES

### **Ouvrage :**

- [1] Antoine Pinte (ENSG) Elisabeth Simonetto « COURS DE PHOTOGRAMMETRIE  
« ESGT – IG4 Janvier 2018, 68 pages.
- [2] Photogrammétrie numérique et perception 3D : les nouvelles conquêtes, mars 2016, 59 pages.
- [3] F. Gervais, Photogrammétrie & imagerie géomatique ; Éléments de photogrammétrie Cours de photo-interprétation, Février 2010, 141 pages.
- [4] Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur Professional Edition, Version 1.1, 2015. [5] Mickaël Brasebin, Sébastien Mustière, Julien Perret, Christiane Weber, Simuler les évolutions urbaines à l'aide de données géographiques urbaines 3D. IGN, COGIT, Université Paris Est, 2014, 22 pages.
- [6] Guide d'utilisateur Phantom 4 pro/pro+ v1.2. 2017
- [7] Bulletin de l'information géographique appliquée aux activités de recherchesdéveloppement, Initiation à la télédétection. 6 pages
- [8] Marcel Laberge, g. et André Verville, a.-g Levés aéroportés par drones Formation continue à l'Ordre des Arpenteurs-Géomètres du Québec., Février 2015

### **Mémoires et thèses :**

- [9] Arnadi Murtiyoso. « Protocoles d'acquisition d'images et de traitement des données par Drone. Modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie », Mémoire d'Ingénieur spécialité Topographie INSA Strasbourg. 21 septembre 2016. 82 pages. [10] Lorenzo Lanzi. « La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques ». École des Sciences Criminelles Institut de Police Scientifique. Thèse de doctorat, 2009, 254 pages.
- [11] Fabing Julien. « Création d'un MNT, d'une ortho-mosaïque et d'une vue 3D à partir de photographies aériennes argentiques numérisées » Me, 2017, 31 pages.



- [12] Mickaël Brasebin. « Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti ». Thèse Doctorat. École Doctorale Mathématique et STIC. 2 avril 2014, 212 pages.
- [13] Laurent Aubry. « Acquisition, Traitement et Restitution des données d'une reconnaissance archéologique », Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 22 janvier 2003. 225 pages. [14] Création de modèles numériques d'élévation pour intégration de projets architecturaux via l'acquisition de données photogrammétriques par drone, Septembre 2014, 56 pages.
- [15] LECLERC Albéric « Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol » ; Mémoire de fin d'études CNAM. 29 Juin 2016. 116 pages.
- [16] Martin VANDENBROECK « Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne - Mise au point et application d'un protocole assurant la reproductibilité de levés répétés à intervalles saisonniers et interannuels », Mémoire de fin d'étude. Sciences géographiques. Septembre 2018, 90 pages.
- [17] RAKOTOMANANJO Ziona Andrianina « Élaboration du Cadastre 3D par Photogrammétrie numérique » Mémoire de fin d'études ESPA Mention IGAT, 4 Septembre 2014. 86 pages.
- [18] HENINTSOA Julie Franciolie Noeline « Orthophotographie issue d'une prise de vue aérienne par drone : conception – évaluation et étude d'impact » Mémoire de fin d'études ESPA Mention IGAT, 6 Novembre 2018.

## WEBOGRAPHIES

- [19] Description des drones ou UAV <http://www.techno-science.net> consulté le 21 juillet 2019
- [20] Test du DJI Phantom 4 PRO, les caractéristiques, [www.helicomicro.com](http://www.helicomicro.com), consulté le 30 juillet 2019
- [21] Logiciel photoscan Agisoft, [www.axxess-solutions.com](http://www.axxess-solutions.com), consulté le 17 Aout 2019
- [22] <http://www.wikipedia.net>



# ANNEXES



## Annexe A

# Agisoft PhotoScan

Rapport de traitement 02

Aout 2019

### 1. Données du levé

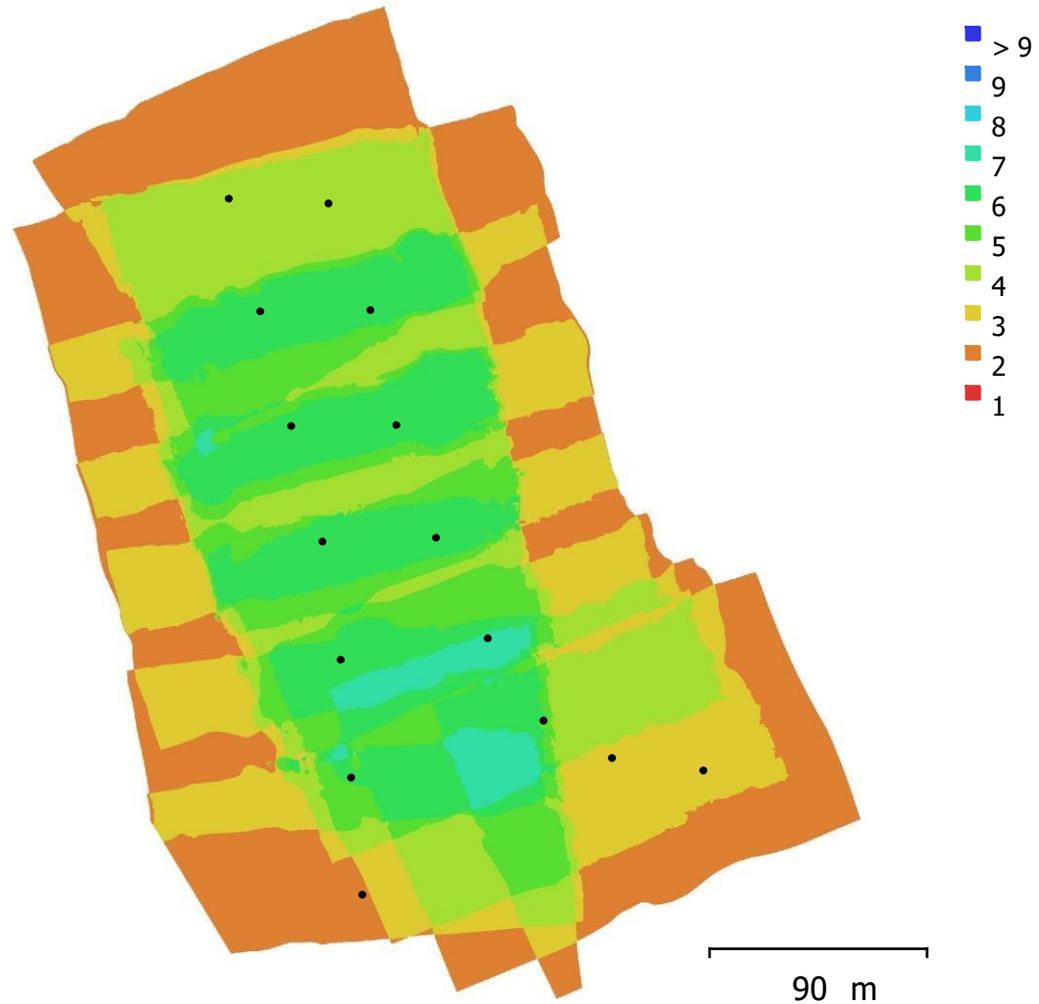


Fig. 1. Emplacements des caméras et chevauchement des images.

Nombre d'images :	15	Stations de caméras :	15	
Altitude de vol :	90 m	Points de liaison :	7,540	
Résolution au sol :	4.73 cm/px	Projections :	0,26	
Zone de couverture :	0.996 km <sup>2</sup>	Erreur de reprojection :	0,11 px	
Modèle de caméra	Résolution	Longueur focale	Taille de pixel	Pré calibré
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 µm	Oui



## 2. Calibration de la caméra

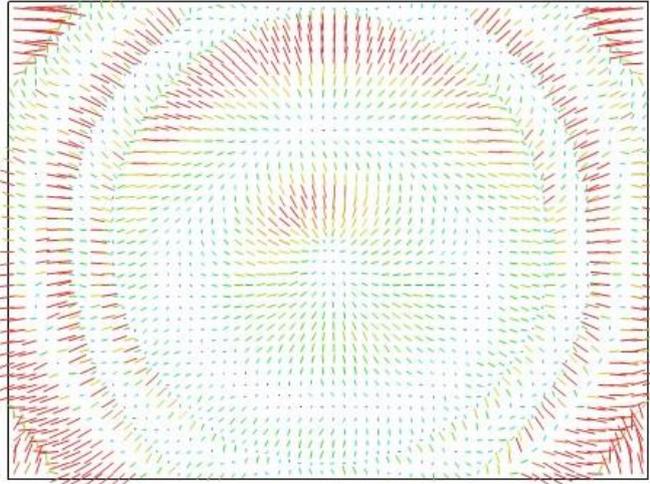


Fig. 2. Résiduelles des points de liaison pour FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm) 15 images, Pré calibré

Type	Résolution			Longueur focale					Taille de pixel	
Cadre	4000 x 3000			3.61 mm					1.56 x 1.56 $\mu\text{m}$	
	Valeur	Erreur	F	Cx	Cy	B1	P1	P2		
F	2143.06	0.81	1.0 0	0.26	- 0.15	0.16	0.09	- 0.09		
Cx	1998.90	-1.1		1.00	- 0.01	0.06	0.85	0.06		
Cy	1500.95	0.95			1.00	- 0.11	0.03	0.91		
B1	- 0.0025	0.89				1.00	0.01	0.00		
P1	-0.00380355	0.00022					1.00	0.10		
P2	0.00333436	0.0002						1.00		



## 2. Filtrage des points terrain



Angle : 30°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 50m

Avec un angle de 30°, la classification n'est pas idéale, car tous les bâtiments ainsi que la végétation ne sont pas classés comme étant en sursol.



Angle : 15°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 50m

En baissant l'angle de moitié, la classification est meilleure, car tous les bâtiments sont classés sursol.



Angle : 15°  
Distance : 3 m  
Taille de la cellule : 50m

Si nous augmentons la distance, tous les bâtiments, notamment ceux qui font moins de 3 mètres, sont classés comme faisant partie du sol.



Angle : 15°  
Distance : 0.5 m  
Taille de la cellule : 50m

En réduisant la distance, certains éléments du sol, surtout là où il y a du fort relief, ont été classés comme étant du sursol, ce qui génère une perte d'information pour le MNT.



## Annexe B

# Rapport de l'aérotriangulation

## I. Settings

### A. Positioning/georeferencing:

- Positioning mode: Automatic vertical

### B. Main settings:

- Key point density: Normal
- Pair selection mode: Default
- Component construction mode: OnePass

### C. Estimation policies:

- Tie points: Compute
- Position: Compute
- Rotation: Compute
- Photogroup estimation mode: OnePass
- Focal length: Keep
- Fisheye focal: AdjustFisheyeFocalSymmetric
- Principal point: Adjust
- Radial distortion: Adjust
- Tangential distortion: Keep
- Fisheye distortion: AdjustFisheyeDistortion\_01xx0

## II. Results

### Global:

- Connections

		Before aerotriangulation	After aerotriangulation
Number of tested pairs	Median number of tested pairs per photo	Median number of connected photos per photo	Median number of connected photos per photo
1824	3	420	8

- Errors



Type	Before aerotriangulation							After aerotriangulation						
	Number of points	Median reprojection error [px]	RMS of reprojection errors [px]	RMS of distances to rays [m]	RMS of 3D errors [m]	RMS of horizontal errors [m]	RMS of vertical errors [m]	Number of points	Median reprojection error [px]	RMS of reprojection errors [px]	RMS of distances to rays [m]	RMS of 3D errors [m]	RMS of horizontal errors [m]	RMS of vertical errors [m]
Automatic_tie_points	0							2835	0.57	0.11	0.26			



## Annexe C

# Code de l'urbanisme et de l'habitat

**DECRET N° 63 -192 DU 27 MARS 1963**

**FIXANT LE CODE DE L'URBANISME ET DE L'HABITAT**

(*J.O. n° 291 du 31.05.63, p. 1265*), modifié par décret n° 69-335 du 29 juillet 1969

(*J.O. n° 658 du 09.08.69, p. 1744*)

### TITRE IV

#### **Du permis de construire**

#### CHAPITRE II

#### **Prescriptions techniques**

##### SECTION PREMIERE

##### *Localisation et desserte des constructions*

**Art. 133** - Le permis de construire doit être refusé :

- si les constructions, par leur situation ou leurs dimensions sont de nature à porter atteinte à la salubrité ou à la sécurité publique ;
- si le constructeur ne peut justifier de son droit de propriété ou d'une autorisation du propriétaire.

**Art. 134** - La construction sur des terrains exposés à un risque naturel tel que : inondation, croisons, affaissement, éboulement, peut, si elle est autorisée, être subordonnée à des conditions spéciales dégageant la responsabilité de la puissance publique.

##### SECTION II

##### *Implantations et volume des constructions*

**Art. 146** - Les bâtiments situés sur un terrain appartenant au même propriétaire doivent être implantés de telle manière que les baies éclairant les pièces d'habitation ne soient masquées par aucune partie d'immeuble qui, à l'appui de ces baies, serait vue sous un angle de plus de 45° au-dessus du plan horizontal. (R = 6) Toutefois, pour la façade la moins ensoleillée, cet angle peut être porté à 60°, à condition que la moitié au plus des pièces habitables prennent jour sur cette façade. En cas de véranda couverte, l'appui des baies considéré serait celui de la main courante du garde-corps (même fictif) de ladite véranda. De plus, un espace d'au moins quatre mètres de largeur sera imposé entre deux bâtiments non contigus si les

Baies éclairant les pièces d'habitation y prennent le jour. Cette distance pourra être ramenée à deux mètres si aucune ouverture de pièces d'habitations n'y prend le jour.



## **Annexe D**

### Mode de vol du drone DJI Phantom 4 pro

#### **Mode de vol**

Trois modes de vol sont disponibles. Vous trouverez ci-dessous les détails correspondant à chacun de ces modes :

**Mode P (positionnement)** : le fonctionnement du mode P est optimal lorsque le signal GPS est fort. L'appareil utilise le GPS, le système optique Vision System et le système de détection infrarouge pour se stabiliser, éviter les obstacles et suivre les objets en mouvement. Dans ce mode, les fonctions avancées comme TapFly et ActiveTrack sont activées.

**Mode S (sport)** : les valeurs de gain de l'appareil sont ajustées pour en améliorer la maniabilité. La vitesse de vol maximale est augmentée à 72 km/h (45 mph). Notez que dans ce mode, les systèmes de détection d'obstacles sont désactivés.

**Mode A (attitude)** : lorsque ni le GPS, ni Vision System ne sont disponibles, l'appareil utilise uniquement son baromètre pour contrôler l'altitude.

---

#### **Mode de vol intelligent (Intelligent Flight)**

Le mode de vol intelligent inclut les fonctionnalités Course Lock, Home Lock, Point of Interest (POI), Follow Me et Waypoints, qui permettent aux utilisateurs de prendre des photos de qualité professionnelle pendant le vol. Les fonctionnalités Course Lock et Home Point Lock permettent de verrouiller l'orientation de l'appareil, afin que l'utilisateur puisse se concentrer davantage sur d'autres opérations. Les fonctionnalités Point of Interest, Follow Me et le mode Waypoints permettent à l'appareil de voler automatiquement en suivant les manœuvres de vol prédéfinies.

**Annexe E**

## Données hydrologiques de l'Ikopa à Anosizato (Service APIPA)

Saison	Hauteur max à L'échelle	Débit	Date	Rang
2018-2019	1,36 m	62 m <sup>3</sup> /s	le 10 février 2019	19
2017-2018	1,98 m	94 m <sup>3</sup> /s	le 26 mars 2018	15
2016-2017	3,12 m	189 m <sup>3</sup> /s	le 10 mars 2017	05
2015-2016	1,64 m	77 m <sup>3</sup> /s	le 26 mars 2016	17
2014-2015	3,21 m	198 m <sup>3</sup> /s	le 27 février 2015	04
2013-2014	1,49 m	68 m <sup>3</sup> /s	le 10 février 2014	18
2012-2013	2,77 m	158 m <sup>3</sup> /s	le 30 janvier 2013	07
2011-2012	2,50 m	136 m <sup>3</sup> /s	le 16 février 2012	08
2010-2011	2,04 m	102 m <sup>3</sup> /s	le 21 décembre 2010	14
2009-2010	2,40 m	128 m <sup>3</sup> /s	le 18 mars 2010	10
2008-2009	2,27 m	119 m <sup>3</sup> /s	le 13 février 2009 à 20 h	11
<b>2007-2008</b>	<b>3,73 m</b>	<b>251 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>le 19 février 2008 à 14 h</b>	<b>01</b>
2006-2007	3,39 m	215 m <sup>3</sup> /s	le 15 janvier 2007 à 4h	02
2005-2006	1,74 m	82 m <sup>3</sup> /s	le 30 décembre 2005 de 3 à 4 h	16
2004-2005	2,09 m	105 m <sup>3</sup> /s	le 3 mars 2005 de 11 à 15 h	13
2003-2004	2,45 m	132 m <sup>3</sup> /s	le 31 janvier 2004 de 10 à 16 h	09
2002-2003	2,90 m	169 m <sup>3</sup> /s	le 22 janvier 2003 de 11 à 19 h	06
2001-2002	2,37 m	114 m <sup>3</sup> /s	le 14 février 2002 à 09 h	12
2000- 2001	3,47 m	211 m <sup>3</sup> /s	le 28 janvier 2001 à 16 h	03



## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>i</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTE DES IMAGES</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>vi</b>
<b>GLOSSAIRES</b> .....	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>PARTIE I : GENERALITES</b> .....	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : PRÉSENTATION DU SUJET</b> .....	<b>4</b>
1.1 Contexte général de l'étude .....	4
1.2 Objectifs .....	4
1.3 Étapes de réalisation .....	5
1.4 Contexte Géographique .....	5
1.4.1 Localisation du site.....	5
1.4.2 Les critères de sélection du site et hypothèse de l'étude .....	6
1.5 Choix d'utilisation de la photogrammétrie par Drone.....	9
<b>Chapitre 2 : L'ESPACE URBAIN ET LA MODELISATION 3D</b> .....	<b>10</b>
2.1 Le tissu urbain. ....	10
2.2 L'analyse urbaine et sa relation à la forme tridimensionnelle.....	11
2.2.1 La troisième dimension a-t-elle sa place ? .....	11
2.2.2 Avantages .....	12
2.2.3 Limites.....	12
2.3 Règle de l'urbanisme et de l'habitat .....	12
<b>Chapitre 3 : TRAITEMENT PHOTOGRAMMETRIQUE</b> .....	<b>14</b>
3.1 La Photogrammétrie aérienne .....	14
3.1.1 Définition [1].....	14
3.1.2 Histoire de la photogrammétrie .....	14



3.1.3 Principe de base.....	16
3.1.4 Modélisation 3D en Photogrammétrie.....	19
3.1.4.1 Situation actuelle.....	19
3.1.4.2 Obtention des images numériques.....	19
3.2 Description de la plateforme Drone pour une PVA .....	20
3.2.1 Définition et éléments composant d'un drone.....	20
3.2.1.1 Définition [19] .....	20
3.2.1.2 Éléments Composants.....	20
3.2.2 Comparaison sur l'utilisation des drones par rapport à la plateforme standard (avion) .....	21
3.2.3 Système de stabilisation de caméra .....	21
3.3 Notion de résolutions [17].....	22
3.3.1 Résolution spatiale vs résolution spectrale.....	23
3.3.2 Résolution proposée en milieu urbain .....	23
<b>PARTIE II : LA RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE .....</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre 4 : PARAMÈTRES D'ACQUISITION D'IMAGES ET ÉTUDE DE PRÉCISION.....</b>	<b>25</b>
4.1 Caractéristiques du DJI Phantom 4 [6].....	25
4.1.1 La structure.....	25
4.1.2 La radiocommande .....	26
4.1.3 Le caméra .....	26
4.2 focale équivalente et focale réelle .....	27
4.3 Étapes suivies pour l'acquisition.....	29
4.4 Paramètre de vol.....	29
4.4.1 Détermination de la hauteur de vol .....	29
4.4.2 L'échelle de prise de vue $e = 1/E_{pv}$ .....	30
4.4.3 La Surface de la zone photographiée.....	30
4.4.4 Distance parcourue .....	31
4.4.5 Vitesse horizontale .....	32
4.4.6 Durée du vol .....	32



4.5 Étude de précision .....	33
4.5.1 Précision planimétrique .....	33
4.5.2 Précision altimétrique .....	33
<b>Chapitre 5 : PROCESSUS DE LA RESTITUTION PROPREMENT DITE.....</b>	<b>34</b>
5.1 La restitution photogrammétrique .....	34
5.1.1 Orientation interne .....	35
5.1.1.1 La marque fiduciaire .....	35
5.1.1.2 Distorsion de l'objectif .....	36
5.1.2 Orientation externe .....	36
5.1.2.1 L'orientation relative .....	37
5.1.2.2 L'orientation absolue .....	38
5.1.3 L'Aérottriangulation .....	39
5.2 Modélisation du terrain .....	40
5.3 L'orthorectification .....	41
5.4 La restitution.....	42
<b>Chapitre 6 : TRAITEMENT DES IMAGES ACQUISES PAR DRONE.....</b>	<b>43</b>
6.1 Le logiciel Agisoft Photoscan .....	43
6.2 Traitement .....	43
6.2.1 L'orientation des images .....	44
6.2.2 Points de contrôle .....	46
6.2.3 Aérottriangulation.....	48
6.2.4 Productions .....	48
<b>PARTIE III : ANALYSES ET REALISATION DE LA SIMULATION URBAINE EN 3D</b> <b>.....</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre 7 : ANALYSE DES RÉSULTATS.....</b>	<b>56</b>
7.1 La maîtrise du drone .....	56
7.1.1 La trajectoire.....	56
7.1.2 Prise des clichés.....	58
7.1.2.1 Position des photos .....	58
7.1.2.2 Précision de l'appareil photo.....	59
7.2 Qualité des images.....	59



7.3 Caractéristiques de la reconstruction.....	60
7.3.1 Homogénéité spatiale .....	61
<b>Chapitre 8 : CONCEPTION DE LA SIMULATION URBAINE .....</b>	<b>64</b>
8.1 Les éléments à aménager.....	64
8.2 Détection des éléments à aménager.....	64
8.2.1 Détection des constructions illicites .....	64
8.2.2 Détection des constructions à risque d’inondation.....	65
8.2.3 Condition d’enseillement des bâtiments .....	66
8.3 Réalisation en 3D de la zone améliorée .....	67
8.3.1 Proposition d’amélioration de la zone.....	68
8.3.2 Evaluation après l’amélioration.....	71
<b>Chapitre 9 : RECOMMANDATIONS ET COÛTS .....</b>	<b>73</b>
9.1 Guide d’utilisation du drone.....	73
9.2 Coût estimatif du projet.....	74
9.2.1 Coût des ressources humaines durant l’étude du projet .....	74
9.2.2 Coût des matériels utilisés et autres.....	75
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES.....</b>	<b>I</b>
<b>WEBOGRAPHIES.....</b>	<b>II</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>III</b>

# UTILISATION DE LA TECHNIQUE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE COMBINÉE A LA METHODE 3D POUR L'AMÉLIORATION D'UN ESPACE URBAIN : Cas d'Ampasika, Région

Analamanga

**Auteur : RANDRIANANTENAINA Anja Harison Oliveli**

**Adresse email : [randroliveli@gmail.com](mailto:randroliveli@gmail.com)**

**Tel : +261 34 08 048 82**

**Nombre de pages : 77**

**Nombre de figures : 33**

**Nombre de tableaux : 13**

## *Résumé*

Cet œuvre présente à répondre un objectif sur l'amélioration d'un espace urbain qui ne respecte pas les règles imposées par le code de l'urbanisme et de l'habitat. La méthode pour réaliser cette étude est décrit dans le présent document depuis l'acquisition des images photogrammétriquement issue d'une prise de vue aérienne par drone jusqu'à l'élaboration des vecteurs 3D de la zone actuelle et les modèles numériques. Puis nous procédons une analyse à partir de ce modèle sur le logiciel Photoscan qui permettra de détecter les éléments urbains nécessitent d'une amélioration. Le résultat final de cet œuvre a indiqué que 100% ou presque la totalité de la zone nécessite une amélioration vis à vis les règles imposées par le code de l'urbanisme et de l'habitat. Ainsi, on a aperçu une réduction de nombre des bâtiments jusqu'à 105 nouveaux identiques et habitable pour 2 ménages différent de type R+1 et de dimension 4m×6m×6m par rapport aux 207 anciens dont 5 R+2, 33 R+1 et 169 RDC.

En conclusion, grâce à la bonne résolution des données que l'amélioration est atteinte dont la structure urbanistique de la zone est bien définie et les conditions de vie urbaine et environnementale des habitants soient ainsi améliorées. On peut définir alors que la technique de la photogrammétrie en 3D a un rôle important à jouer en matière de développement durable urbain.

**Mots-clés** : photogrammétrie, drone, 3D, espace urbain.

## *Abstract*

This work presents to meet an objective of improving an urban space who doesn't respect the rules imposed by the town planning and housing code .The method for carrying out this study is described in this document since the acquisition of photogrammetric images from a aerial photography by drone until the development of 3D vectors of the current area and the digital models. Then we proceed to an analysis from this model on the Photoscan software which will allow detecting urban elements needs improvement. The final result of this work indicated that 100% or almost the entire area requires improvement with respect to the rules imposed by the town planning code and habitat. Thus, we saw a reduction in the number of buildings to 105 new identical and habitable for 2 different households of type R + 1 and of dimension 4m × 6m × 6m compared to the 207 old ones including 5 R + 2, 33 R + 1 and 169 Ground floor. In conclusion, thanks to the good resolution of the data that the improvement is reached whose urban structure of the area is well defined and the urban and environmental living conditions of inhabitants. We can then define that the technique of photogrammetry in 3D has an important role to play in urban sustainable development.

**Keywords**: photogrammetry, UAV, 3D, Urban space.

### Encadreurs :

✚ Docteur ANDRIAMASIMANANA Rado : Maitre de conférences et Enseignant à L'ESPA

**E-mail** : [andriamasimanana@hotmail.com](mailto:andriamasimanana@hotmail.com)

**Tel** : +261 34 06 640 30

✚ Madame RAHAJANIRINA Michelle : Ingénieur, Chef de Service de l'Imagerie, Espace et Photogrammétrie du FTM, **Tel** : +261 34 27 127 79