



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Année Universitaire 2012-2013



Département Information Géographique et Foncière

Géomètre Topographe

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du*

*Diplôme d'Ingénieur Géomètre-Topographe*

# ELABORATION DU CADASTRE 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE



Présenté par : RAKOTOMANANJO Ziona Andrianina

### Membres de Jury :

- Président : Monsieur RABARIMANANA Mamy
- Examinateur : Monsieur RABEMALAZAMANANA
- Examinateur : Madame RABEHERIMANANA Lyliane
- Encadreur pédagogique : Monsieur RAJAONARISON Jean Désiré
- Encadreur professionnel : Monsieur RAZAFINDRAKOTOHARY Tiana Richard

*Soutenu le 4 Septembre 2014*



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo



Année Universitaire 2012-2013

Département Information Géographique et Foncière

Géomètre Topographe

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du*

*Diplôme d'Ingénieur Géomètre-Topographe*

**ELABORATION DU CADASTRE 3D PAR  
PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE**

Présenté par : RAKOTOMANANJO Ziona Andrianina

Soutenu le : 04 Septembre 2014

Président du Jury : Monsieur RABARIMANANA Mamy

Chef de département de la filière Information Géographique et Foncière

Examinateur : Madame RABEHERIMANANA Lyliane

Maitre de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Monsieur RABEMALAZAMANANA

Ingénieur Géomètre Topographe au FTM

Enseignant à l'ESPA

Rapporteurs : Monsieur RAJAONARISON Jean Désiré

Directeur Technique au FTM

Enseignant à l'ESPA

Monsieur RAZAFINDRAKOTOHARY Tiana Richard

Responsable de la Modernisation et de la restructuration des Services Fonciers

au Programme National Foncier



# REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage durant l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine, Directeur de l'ESPA pour m'avoir accueilli dans son établissement durant ces cinq dernières années.*

*J'adresse également mes sincères gratitude à Monsieur RABARIMANANA Mamy, Chef de Département Information Géographique et Foncière, qui a fait en sorte que ces années nous aient été fructueuses, Je le remercie aussi pour avoir créé le partenariat entre son Département et la société SARY TANY Madagascar.*

*Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans la collaboration et l'aide précieuse des personnes suivantes que je tiens à remercier :*

- *Monsieur RAMAHEFAHARISON Seta, Responsable du bureau d'étude au sein du SARY TANY Madagascar, pour son accueil, sa patience, la confiance qu'il m'a accordé, et surtout ses conseils pendant mon stage de fin d'études.*
- *Monsieur RAJAONARISON Jean Désiré, Enseignant vacataire à l'ESPA, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa patience ainsi que sa relecture attentive et constructive de ce rapport. Je le remercie pour l'honneur qu'il m'a donné en acceptant de m'encadrer malgré ses obligations.*
- *Monsieur RAZAFINDRAKOTOHARY Tiana Richard, responsable de la Modernisation et de la restructuration des Services Fonciers au Programme National Foncier pour m'avoir orienté et conseillé quant à la manière dont j'ai mené la réalisation et l'aboutissement de ce travail. Je lui exprime ma gratitude pour l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de ce thème.*
- *Monsieur RABEMALAZAMANANA et Madame RABEHÉRIMANANA Lyliane, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Je suis très sensible à la bienveillante spontanéité avec laquelle ils ont accepté de faire partie de mon Jury de soutenance.*

*Je remercie également tout le membre du personnel de SARY TANY Madagascar pour leur collaboration et leur accueil chaleureux. Ma reconnaissance s'adresse particulièrement à Joely et Jaona, pour leurs conseils, leurs soutiens et aides.*

*Je salue le dévouement et les sacrifices prodigués par les membres de ma famille, surtout ma femme, à mon égard dans leurs soutiens tant affectifs et moraux que matériels durant ces longues années d'études. Je ne remercierai jamais assez mes amis qui ont toujours été là pour moi.*

*Enfin, sans qu'il soit possible de les énumérer toutes, je remercie sincèrement les personnes que j'ai été amené à solliciter au cours de ce travail de fin d'études. J'exprime mes sincères reconnaissances à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.*

*Que Dieu vous bénisse tous!*

# AVANT-PROPOS

*Ce travail a pour objectif de créer un système de gestion de la copropriété verticale connu sur le système « Cadastre 3D » dans le monde actuel.*

*Ayant proposé ce thème au sein de la société SARY TANY, j'ai eu de la chance d'avoir acquis les données photogrammétriques nécessaires pour réaliser ce présent mémoire.*

*Par ailleurs, une part de ce travail s'est réalisée conjointement au sein du PNF Madagascar pour une collecte d'informations foncières sur la copropriété à Madagascar.*

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....i

Avant-propos.....ii

Liste des abréviations.....vii

Liste des tableaux.....ix

Liste des figures.....x

Introduction.....1

## PARTIE I : GENERALITES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CADASTRE 3D ..... 3

I. Introduction ..... 3

II. Principe du cadastre 3D ..... 3

1) Cadastre avec des étiquettes 3D ..... 4

2) Cadastre hybride ..... 4

3) CADASTRE ENTIEREMENT 3D ..... 5

III Cadastre 3D dans le Monde ..... 6

1) Cas d'Australie (Queensland) ..... 6

2) Cas de l'Espagne ..... 9

3) Cas du Cadastre québécois ..... 10

4) Cas de Pays-Bas ..... 12

5) Synthèse des quatre systèmes cadastraux examinés ..... 13

CHAPITRE II : Généralités sur l'immatriculation des appartements à Madagascar ..... 14

I Démembrement ..... 14

1) Définition ..... 14

2) Système de Démembrement .....	14
3) Travail en démembrement.....	15
II Les parties prenantes.....	16
1) Société de construction .....	16
2) Copropriétaires des immeubles.....	16

## PARTIE II : TECHNIQUE D'ACQUISITION

CHAPITRE I : PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE.....	19
I Notion générale .....	19
1) Définition.....	19
2) Principe général.....	19
3) Processus de traitement en photogrammétrie.....	21
II Spécifications des levés photogrammétriques .....	22
1) Prise de vue .....	22
2) Choix de la focale .....	24
3) Résolution spatiale .....	28
4) Synthèse générale .....	28
III Modélisation 3D en Photogrammétrie .....	29
1) Situation actuelle.....	29
2) Obtention des images numériques .....	29
3) Photographie aérienne des zones urbaines.....	30
IV Restitution photogrammétrique .....	32
1) Définition.....	32
2) Matériel de restitution .....	32
3) Méthode de Restitution .....	33
CHAPITRE II : LIDAR .....	35
I Généralités sur Lidar .....	35
1) Définition.....	35
2) Principe général.....	35
3) Principe géométrique.....	36
4) Principe d'écho multiple .....	37
II Outils et matériels.....	38
1) Matériel utilisé .....	38

2) Plan de vol .....	42
III Contrôle de précision LiDAR.....	42
1) Détection des échos.....	43
2) Densité des points.....	43
3) Système de référencement.....	43
IV Spécification pour le système cadastre 3D .....	44
1) Mode Multi-écho .....	44
2) Plan de vol .....	45
3) Système de référencement.....	46

### PARTIE III : CONCEPTION DU CADASTRE 3D

CHAPITRE I : PRESENTATION DES DONNEES .....	48
I Traitement des données brutes .....	48
1) Etape de traitement .....	48
2) Logiciel de traitement.....	49
3) Format des images .....	50
II Analyse des données.....	51
1) Données de la Restitution photogrammétrique .....	51
2) MNT de l'agglomération d'Antananarivo.....	52
3) Dossier de Démembrement .....	53
4) Choix de la zone.....	53
CHAPITRE II : CONCEPTION DU PROTOTYPE CADASTRE 3D (CAS DE LA COPROPRIETE).....	55
I Prise en main des données.....	55
1) Gestion des calques dans AUTOCAD/COVADIS .....	55
2) Traitement par étage.....	57
II Gestion des bâtiments .....	59
1) Présentation des bâtis sur TERRA EXPLORER .....	59
2) Gestion proposée .....	59
III Autres possibilités offertes.....	62
1) Modélisation du Sous-sols.....	62
2) Modélisation des scènes urbaines .....	63
3) Modélisation de restrictions publiques.....	66
4) Rôle du géomètre expert.....	67

CHAPITRE III : PERSPECTIVE LiDAR .....	70
I Traitement des données brutes.....	70
1) Notion de nuage de point .....	70
2) Préparation des données .....	71
3) Contrôle des données .....	71
4) Méthodologie de traitement.....	73
II Phase de Prétraitement.....	73
1) Logiciel.....	73
2) Chargement du bloc .....	74
III Filtrage des points .....	76
1) Création du Modèle Numérique du Terrain.....	76
2) Création d'une classification .....	78
3) Classification des points .....	78
VI Modélisation des bâtiments .....	80
1) Classification des bâtiments.....	80
2) Création de la modèle Numérique de Surface .....	80
3) Vectorisation des bâtiments .....	81
CHAPITRE IV : ETUDE COMPARATIVE .....	83
I Comparaison sur la précision .....	83
1) Précision des données sur trajectographie .....	83
2) Générations des points .....	83
3) Identification image .....	83
II Tableau de synthèse des deux méthodes .....	85
CONCLUSION	
BIBLIOGRAPHIE.....	87
WEBOGRAPHIE .....	88
ANNEXE .....	90
TABLE DES MATIERES.....	110

## Liste des abréviations

2D	: Deux Dimensions
3D	: Trois Dimensions
B/H	: Base/Hauteur
CCD	: Charge Couple Device
DAO	: Dessin Assisté par Ordinateur
DGN	: Design (format de données de MicroStation)
dpi	: dot per inch
DST	: Directions des Services Topographiques
DWG	: Digital Working Group
DXF	: Drawing eXchange Format (format d'échange de données)
FIG	: Fédération Internationale des Géomètres
GSD	: Ground Sample Distance
GPS	: Global Positionning System
INS	: Inertial Navigation System
IGN	: INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE
JPEG	: JPEG Joint Photographic Experts Group (format d'images numériques)
KML	: Keyhole Markup Language
LAS	: Format de donnée LiDAR
LiDAR	: Light Detection and Ranging
LPS	: Leica Photogrammetry Suite
MNS	: Modèle Numérique du Surface
MNT	: Modèle Numérique du Terrain
MNC	: Modèle Numérique de Canopée
MPT	: Modèle Photogrammétrique Topographique
NASA	: National Aeronautics Space Administration

PC	: Parcellle Cadastrale
PV	: Procès Verbal
PCMCIA	: Personnal Computer Memory Card International Association
PRJ	: Projection
PC	: Personnal Computer
PNF	: Programme National Foncier
RDPPF	: Restrictions de Droit Public à la Propriété Foncière
RAW	: Ensemble de formats d'images numériques "bruts"
SGDC	: Spanish General Directorate for Cadastre
SEIMAD	: Société d'Equipement Immobilière de MADagascar
SPOT	: Système Probatoire d'Observation de la Terra
SIG	: Système d'Information géographique
SIT	: Système d'Information Topographique
TIFF	: Tagged Image File Format
USA	: United States of America
WGS	: World Geodetic System
WGS84	: World Geodetic System 1984

## Liste des tableaux

**Tableau n° 1 :** Synthèse de représentation cadastrale dans le cas de copropriétés aux systèmes cadastraux du Québec, du Pays-Bas, du Queensland et de l'Espagne

**Tableau n° 2 :** Classe de précision en fonction de l'échelle et du GSD

**Tableau n° 3 :** Précision par combinaison GPS/INS

**Tableau n° 4 :** Distinction des densités des points en fonction des projets

**Tableau n° 5 :** Critère de choix pour l'aéronef, en fonction de la densité, de la précision et du terrain

**Tableau n° 6 :** Description des trois formats d'image

**Tableau n° 7 :** Comparaison entre photogrammétrie numérique et LiDAR

## Liste des figures

**Figure n° 1 :** Représentation du plan volumique

**Figure n° 2 :** Identification des sous-parcelles sur le plan cadastral et Représentation 3D des sous-parcelles

**Figure n° 3 :** Plan cadastre global

**Figure n° 4:** Coupe d'un plan par étage

**Figure n° 5:** Plans de division de Pays-Bas

**Figure n° 6 :** Exemple de prive de vue

**Figure n° 7 :** De l'objet 2D (photographies) aux objets 3D

**Figure n° 8 :** Processus de traitement en photogrammétrie

**Figure n°9 :** Schéma illustrant l'angle d'intersection au niveau d'un point de détail en fonction du rapport B/H.

**Figure n° 10 :** Type de focale

**Figure n° 11 :** Représentation de la taille du GSD

**Figure n° 12 :** Caméra numérique UltraCam

**Figure n° 13 :** Etapes pour aboutir à un système cadastre 3D

**Figure n° 14:** Présentation des matériels photogrammétriques.

**Figure n° 15 :** Principe général du LiDAR

**Figure n° 16 :** Géométrie du LiDAR

**Figure n° 17 :** Principe d'écho multiple et représentation des nuages des points

**Figure n° 18 :** Type de scanner Laser (ALS 40)

**Figure n° 19 :** Principe de la correction de l'IMU par le GPS

**Figure n° 20 :** Caméra numérique Ultracam X-Prime

**Figure n° 21 :** Type de plateforme à deux trappes

**Figure n° 22 :** Relation entre la fréquence de scannage et l'Altitude de vol

**Figure n° 23 :** Comparaison entre l'altitude des premier et dernier échos laser en zone urbaine

**Figure n° 24 :** Etapes de traitement par ordinateur

**Figure n° 25 :** Bloc de photo sur de Tanà-Ville

**Figure n° 26 :** Restitution sur Anosy dans Autocad

**Figure n° 27 :** MNT sur l'agglomération d'Antananarivo

**Figure n° 28 :** Image bâtiment CEXAM Ampefiloha

**Figure n° 29 :** Extrait de calque de la restitution

**Figure n° 30 :** Bâtiment A vu de dessus avec le calque

**Figure n° 31 :** Exemple de séparation des lots d'appartement

**Figure n° 32 :** Comparaison entre calque sur Terra et calque sur Autocad

**Figure n° 33 :** Illustration des bâtiments dans terra explorer

**Figure n° 34 :** Présentation des calques importées dans Terra explorer Pro

**Figure n° 35 :** Affichage de l'appartement

**Figure n° 36 :** Zone de recherche

**Figure n° 37 :** Présentation de l'affichage du pdf stocké dans les parcelles

**Figure n° 38 :** Image du sous-sol

**Figure n° 39 :** Restitution du Tunnel Ambohijatovo sur Autocad

**Figure n° 40 :** Import dans Google Sketchup

**Figure n° 41 :** Comparaison entre calque sur Autocad et Google Sketchup

**Figure n° 42 :** Modélisation 3D Tetezana Ambohijatovo

**Figure n° 43 :** Type d'export de format par Google Sketchup

**Figure n° 44 :** Quelques exemples de représentation simplifiée du cadastre RDPPF

**Figure n° 45 :** Vue isométrique d'un nuage de point

**Figure n° 46 :** Représentation des nuages de points selon divers

**Figure n° 47 :** Ouverture du fichier DGN

**Figure n° 48 :** Chargement des points LAS

**Figure n° 49 :** Syncrhonisation des vues

**Figure n° 50 :** Personnalisation des touches

**Figure n° 51 :** Calcul de surface

**Figure n° 52 :** Paramétrage du MNT

**Figure n° 53 :** Création d'une classification

**Figure n° 54 :** Affichage de la sélection

**Figure n° 55 :** Représentation des vues selon différentes vues

**Figure n° 56 :** Exemple de type de Macro « Nettoyage des points en l'air »

**Figure n° 57 :** Figure de sélection du bâtiment

**Figure n° 58 :** Paramètre de vectorisation des bâtiments

**Figure n° 59 :** Résultat de la vectorisation du bâtiment

**Figure n° 60 :** Type de produit de batiment 3D reconstruit par des nuages de points

**Figure n° 61 :** Comparaison entre image du Photographie aérienne et du LiDAR

## INTRODUCTION

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 des aménagements urbains. Ces systèmes de DAO 3D contiennent des outils de visualisation 3D, des liaisons avec des bases de données pour l'analyse mais sont limités dans le domaine de l'analyse spatiale 3D. Ainsi cette tendance en 3D vient toucher plusieurs domaines dont l'un est la gestion du système cadastral.

Au cours de ces dernières décennies, l'utilisation du sol a non seulement considérablement augmenté, mais s'est complexifiée et diversifiée. Cette tendance entraîne une importance croissante de la description précise et fiable de la propriété foncière. Dans la plupart des cas, une description des droits de la propriété en deux dimensions suffit pour donner des informations claires sur le statut juridique de l'immobilier. En cas d'utilisation multiple de l'espace, avec des droits de propriété en sous-sol ou sursol, le cadastre 2D n'est plus suffisant et cela nous oblige de tendre vers une solution en trois dimensions. Le projet ainsi décrit dans ce mémoire consiste à concevoir une structure 3D en intégrant des données cadastrales pour une gestion suivant une altitude donnée. Ainsi donc pour rester dans le domaine de la topographie, le processus choisi pour l'acquisition des données est la photogrammétrie aérienne. Cela nous permettra d'avoir en général, la reconstruction des bâtiments qui est l'objectif principal de cette étude.

Cette étude comprend trois parties. La première partie introduira le concept du cadastre 3D, son origine, ainsi que des diverses expériences poussant à faire évoluer le système dans le monde. Une notion de gestion de copropriété à Madagascar sera aussi présentée afin de faire ressortir ce besoin en 3D.

La seconde partie, consacrée à la technique d'acquisition des données, parlera en premier lieu de la photogrammétrie numérique pour mieux voir les principes ainsi que les méthodes de traitement pour des applications en cadastre 3D. Ensuite, on va évoquer le système Lasergrammétrie aérienne, qui est lui aussi, dans le domaine de la photogrammétrie, mais de façon plus évoluée. On va faire ressortir son apport en 3D.

La dernière partie sera dédiée pour la conception du cadastre 3D. Elle sera consacrée à l'étude personnelle effectuée pour créer un système graphique, capable de répondre à un exemple de système du Cadastre 3D pour le cas de copropriété à Madagascar.

---

# PARTIE I : GENERALITES

---

*La première partie de ce mémoire parle des généralités sur le cadastre 3D depuis sa création, ses principes et son écho à travers le monde. Une notion sur l'immatriculation des propriétés verticales à Madagascar est aussi évoquée dans le second chapitre pour ressentir le besoin d'un nouveau système, celui du CADASTRE 3D.*

# CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CADASTRE 3D

## I. Introduction

La croissance démographique, le développement des villes et l'urbanisation durant les deux derniers siècles, ont considérablement augmenté. Les pressions sur l'utilisation des terres ont suscité un intérêt croissant pour l'utilisation de l'espace en dessus et au-dessous du sol. Des infrastructures souterraines comme les tunnels, métro, stationnements, des bâtiments multiniveaux partout dans le monde sont les résultats de l'urbanisation et des représentations des propriétés superposées dans l'espace. La gestion des données devient de plus en plus complexe, ce qui implique l'installation de nouveau système.

Le terme « cadastre 3D » fut énoncé pour la première fois en 1998 par la publication du rapport intitulé Cadastre 2014 par la Fédération Internationale des Géomètre (FIG). Ceci créa une inspiration chez les professionnels et dans les administrations publiques pour la mise en place de ce système. La thèse de Jantine Esther Stoter intitulé « 3D Cadastre » fut la première étude. Depuis, plusieurs pays dans le monde essaient de l'appliquer.

La Fédération Internationale des Géomètres (FIG) a effectué une enquête sur le cadastre 3D à travers le Monde [FIG 1995]. Le but principal de cette enquête était de pouvoir dresser un inventaire des différents modes de gestion de la troisième dimension dans le système cadastral surtout sur les propriétés superposées. Beaucoup de Pays ont répondu au questionnaire tel que l'Allemagne, l'Angleterre, l'Argentine, l'Australie, l'Autriche, le Brésil, la Chine...

Ce chapitre vise à mettre en évidence, les principes du cadastre 3D ainsi que quelques exemples d'expériences à travers le monde sur le système.

## II. Principe du cadastre 3D

Plusieurs chercheurs et organisations ont montré les rôles et les apports d'une représentation en trois dimensions dans le système cadastral. Depuis, la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) fait des enquêtes sur ce thème à travers le monde. J.Stoter était le premier qui a fait l'approche du système [Stoter 2004].

Il existe 3 types de cadastre selon lui : le cadastre avec une étiquette 3D, le cadastre hybride et le cadastre entièrement 3D. Ce sont les principes de base qui servent de réflexion pour d'autres études à venir.

## 1) Cadastre avec des étiquettes 3D

Il consiste à marquer à l'aide des étiquettes les informations en 3D sur le plan cadastral informatisé en 2D. Ces étiquettes précisent à l'utilisateur les références correspondant aux documents contenant les informations 3D (acte ou plan). En plus de l'étiquette, une référence peut être ajoutée à un document juridique ou à un dessin qui illustre la situation. La référence peut être mise en œuvre de façon diverse.

Le propriétaire est donc chargé de trouver les autres informations complémentaires au sein des bureaux administratifs destinés.

L'inconvénient de ce cadastre est qu'il ne répond pas au résultat recherché, celui de comprendre les situations 3D et de gérer ces informations. Il ne permet pas l'automatisation et l'échange des données.

## 2) Cadastre hybride

C'est un cadastre où l'on ajoute dans la parcelle 2D existante, les données existantes sur terrain 3D. Les principaux éléments figurés sont les objets physiques ainsi que les droits volumiques rattachés à la parcelle. Il en résulte une solution hybride à l'enregistrement des droits volumiques et un enregistrement de la situation 3D. Ceci peut être réalisé sous forme de texte, d'annotation, de plans et de coupes, de dessins 3D ou de volumes sur les propriétés.

L'utilisation de texte permet d'identifier de manière alphanumérique le plan cadastral. C'est-à-dire, la création d'un lien entre le plan cadastral et des documents complémentaires expliquant la composante verticale de propriétés superposées. Les plans et les coupes sont utilisés pour décrire l'existence des propriétés superposées par les plans annexés au plan Cadastral. Les dessins en 3D permettent une représentation de la situation verticale.

Le cadastre Hybride propose deux solutions : l'enregistrement des droits volumiques en 3D et l'enregistrement des objets physiques.

### a) L'enregistrement des droits volumiques en 3D

Ici, la parcelle est le point de départ de l'enregistrement pour montrer les droits et obligations. Le droit volumique est un espace légal lié à un droit attaché à une parcelle sur les situations en 3D.

L'espace juridique est l'espace dans lequel le propriétaire d'un objet physique demande des droits afin d'assurer sa possession. Par exemple, le propriétaire d'un terrain peut s'étendre dans le tréfonds et le sur-fonds. Ceci dit qu'il a droit sur l'étendue de sa propriété tout en tenant compte de ces droits. Dans le cas de l'existence d'un tunnel au-dessus de la parcelle, les limites du tunnel sont définies par un volume au-dessus de la surface. Le propriétaire de la parcelle est donc limité dans son utilisation de la surface. Il est donc nécessaire de fixer ces droits.

Ainsi, les limites spatiales des droits doivent être précisément décrites dans les actes et plans. Par exemple le droit sur la hauteur des bâtiments en ville ou le droit de construire dans le sous-sol, une servitude de passage. Ainsi, les situations 3D peuvent être consultées puisque les droits sont reliés à

une base de données contenant des informations non spatiales. Notons que l'installation de ces droits volumiques dépend du système juridique du pays. Un droit de volume 3D ne peut être enregistré que lorsqu'un droit établi sera enregistré dans l'enregistrement cadastral.

Une solution est envisageable pour avoir l'étendue spatiale de tout objet physique dans l'enregistrement cadastral. Cette solution pourrait enregistrer un volume renfermant l'espace juridique de l'objet physique. Ce qui est en effet le cas de l'alternative de combinée 2D/3D.

#### b) *Enregistrement des objets physiques*

Dans ce système, on enregistre les objets vus en 3D sur les parcelles (les constructions ou infrastructures qui se trouvent au-dessus ou en dessous de la surface de la parcelle). Cette solution peut être adaptée même en cas de situation difficile à figurer en 2D. Par exemple dans le cas où un tunnel traverse plusieurs parcelles (cas du tunnel Ambohijatovo).

Seul l'objet sera enregistré dans son intégralité avec des descriptions spatiales à l'aide de plans ou coupes. Ces objets seront ajoutés aux données géographiques. On peut invoquer un système d'immatriculation des objets physiques.

La représentation de l'objet doit refléter la réalité et une mise à jour permanente. Ces bases de données cadastrales des objets physiques à disposition permettent une meilleure vue d'ensemble de la réalité. Elles offrent une solution pour les bâtiments complexes ou les infrastructures.

Au Pays-Bas, les conclusions juridiques ne peuvent être tirées de fait mais de l'enregistrement cadastral. On se base sur l'interrogation des enregistrements cadastraux en 3D sans examiner le document source comme les actes ou les plans. Par conséquent, la qualité des représentations 3D doit être précise pour l'utilisation pratique. On peut élargir l'étude sur l'enregistrement des objets physiques.

### 3) *Cadastre entièrement 3D*

Dans ce système, la parcelle 2D est totalement abandonnée. Dans le cadastre entièrement 3D, les droits ne sont plus établis sur des parcelles mais définis par des volumes étudiés. Ils impliquent des aires et des volumes auxquels les droits sont rattachés.

L'étude se divise en deux parties : l'alternative de combinée 2D/3D et le cadastre purement 3D.

#### a) *Combinaison 2D/3D du cadastre*

Cette étude paraît être la même que celle du cadastre hybride. Leur différence est que dans celle-ci, les parcelles deviennent des colonnes infinies et des volumes distingués. La surface cadastre existante est drapée sur le MNT.

### b) *Cadastre purement 3D*

Dans ce concept, le cadastre est entièrement en 3D. On ne prend compte que les espaces volumiques. Le cadastre traditionnel est totalement abandonné. Les droits de propriété sont uniquement rattachés aux parcelles volumiques. Les droits de propriété sur les objets immobiliers ne peuvent être liés qu'à des parcelles volumiques définies et délimitées en 3D. Les parcelles de volume qui sont la base de l'enregistrement forment une partition complète d'espace 3D sans lacunes ni chevauchements.

Ce système modifie aussi le cadre juridique puisqu'on assiste à un changement de droits de propriété.

Cependant, une question se pose pour ce type de cadastre qui ne prend compte que l'espace volumique, s'il est réalisable pour des inscriptions cadastrales par rapport à la parcelle 2D qui existait depuis longtemps. Cela nécessite beaucoup de débat au niveau administratif qu'au niveau public.

## III Cadastre 3D dans le Monde

Dans ce paragraphe, on va étudier quelques types de cadastre dans d'autres Pays étrangers pour faire ressortir diverses gestions de la troisième dimension dans le monde [Abbas 2014].

### 1) *Cas d'Australie (Queensland)*

L'idée d'un questionnaire cadastre 3D a été née en Australie. Le système est que toutes les juridictions autorisent l'enregistrement des colonnes 3D sans référence à une structure physique. Le Queensland est une province Australienne qui propose des représentations en 2D mais aussi des définitions des volumes et des documents en perspective. On retrouve des plans standards qui définissent des parcelles en 2D avec une numérotation composée de chiffre unique. Ces plans sont très classiques et s'apparentent à la plupart des autres cadastres 2D. Dans le cas de bâtiments en copropriété, des plans de bâtiments sont utilisés.

Ces plans sont composés de plusieurs feuillets. La première est le plan principal qui montre les limites des parcelles comme le plan standard. La deuxième concerne les plans qui s'appuient sur la structure du bâtiment pour définir la copropriété.

Dans le système cadastral du Queensland, la parcelle signifie un lot, une propriété commune ou une zone d'usage exclusif. Un lot est défini grâce aux murs, planchers et plafonds qui sont identifiés par une numérotation spécifique. Chaque lot de copropriété est représenté par une parcelle volumétrique dont les limites sont des surfaces. Cette représentation de parcelle volumétrique est très intéressante car elle est réalisée au moyen d'une vue isométrique et d'une empreinte au sol.

Pour gérer ou représenter le morcellement du territoire, le cadastre du Queensland est défini par cinq types de parcelles : la parcelle standard, parcelle de bâtiment, parcelle restreinte, parcelle volumique et parcelle restante.

### a) La parcelle standard

La parcelle standard est une parcelle définie par des colonnes infinies c'est-à-dire une parcelle illimitée en hauteur et en profondeur. Elle peut être subdivisée en trois formats de plans :

- Le plan standard crée des parcelles 2D au niveau du sol et illimitées en hauteur et en profondeur.
- Le plan de bâtiment crée des parcelles définies et illimitées en hauteur et en profondeur qui sont utilisées dans le cas de copropriétés.
- Le plan volumique crée des parcelles entièrement fermées par des surfaces bornées. Ces parcelles peuvent occuper n'importe quelle position dans l'espace par rapport à la surface du sol, soit partiellement ou entièrement en dessus ou au-dessous du sol.

### b) La parcelle de bâtiment

La parcelle est définie par les planchers, les murs et les plafonds. Ce genre de parcelle est au moins divisé en deux parties privatives et une partie commune. Ce type de division est utilisé dans le cas de copropriété et les limites des parcelles de bâtiment sont représentées sur les plans de bâtiments.

### c) La parcelle restreinte

La parcelle limitée en hauteur ou en profondeur d'une distance est définie par rapport à une surface. Leurs limites sont indiquées sur les plans standards soit par la valeur relative à la surface ou par un plan défini.

### d) La parcelle volumique

La parcelle entièrement délimitée et bornée dans l'espace est définie par des surfaces fermées. Cette parcelle indépendante de la surface des parcelles standards, pourrait être partiellement ou entièrement en dessus ou au-dessous de la surface du sol. La parcelle volumique est définie par les limites et les niveaux calculés par un géomètre. Elle est représentée par des plans volumiques.

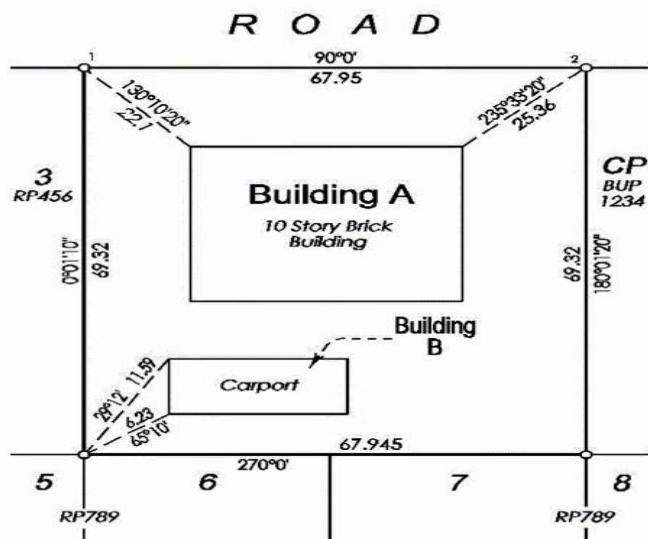
### e) La parcelle restante

La parcelle restante est obtenue par la subdivision de la parcelle standard avec une parcelle de bâtiment ou une parcelle volumique.

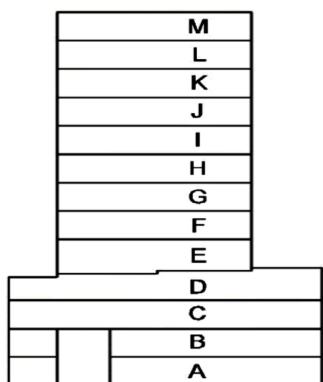
Dans le cas de Queensland, les limites du système en place représentent un manque d'interactivité de la représentation car il n'y a pas de norme pour la représentation en perspective et seulement une partie des bâtiments est concernée par une gestion en 3D. Ce qui limite les études du voisinage.

Pour la représentation de la propriété superposée, le plan de bâtiment est utilisé afin de subdiviser une parcelle. Il définit l'utilisation des éléments structuraux d'un bâtiment y compris les planchers, les murs et les plafonds. Chaque lot sur le plan de bâtiment possède un identifiant numérique unique de chiffre qui est généralement composé du numéro de la tour ou du bâtiment.

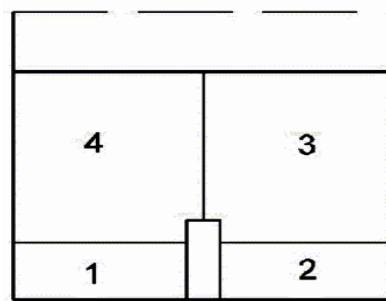
Le plan de bâtiment est défini par le plan principal qui représente les limites de la parcelle standard et l'emplacement de chaque bâtiment ou construction par rapport aux limites extérieures de la parcelle. Le nombre d'étage est indiqué sur le plan principal. Les autres plans complémentaires tels que le plan de chaque étage ou le plan de véranda sont également utilisés pour représenter la structure des bâtiments. La vue latérale montre l'emplacement vertical des unités d'appartements. Les coordonnées altimétriques de chaque coin de parcelle volumique sont représentées sur le plan volumique.



Plan principal



Vue latéral



plan de niveau D

Figure 1 : Représentation du plan volumique

On retrouvera les figures de ces divers plans dans l'annexe 1.

## 2) Cas de l'Espagne

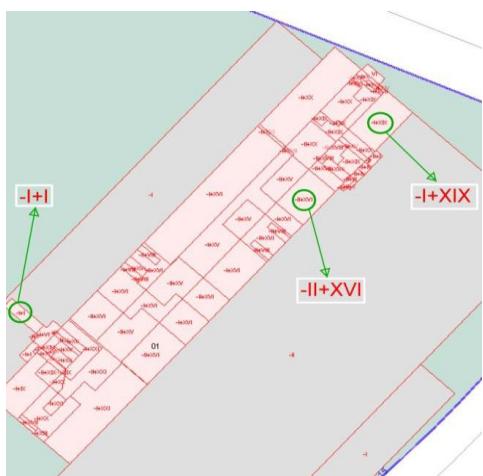
Le cadastre espagnol est principalement un cadastre fiscal et un registre du morcellement du territoire de l'immobilier rural et urbain. Ce cadastre est sous la responsabilité de la direction générale espagnole du cadastre dit « Spanish General Directorate for Cadastre » (SGDC).

Dans le cas des propriétés superposées, un bâtiment est subdivisé en unité de bâtiments dite sous-parcelles, qui sont distinguées par un identifiant spécifique. L'empreinte des sous-parcelles apparaît sur le plan cadastral 2D sous forme de polygones fermés.

Un chiffre romain est utilisé dans chacun des polygones afin de montrer sa nature ou la composante verticale du bâtiment comme le nombre d'étages ou de sous-sols. Chaque sous-parcelle est identifiée par un chiffre romain. Le signe moins (-) devant le chiffre romain montre la présence de sous-sols et le signe plus (+) montre la présence d'étages.

Par exemple, le polygone de la sous-parcelle possédant le chiffre « -I+I », est composé d'un sous-sol et un étage, ou le chiffre « -II+XVI » s'agit d'une sous-parcelle composée de deux sous-sols et 16 étages.

Les détails de l'intérieur d'un bâtiment sont également représentés sur les plans 2D d'étages. La combinaison des attributs et des numérotations attachées aux propriétés permet de connaître la présence des propriétés superposées ainsi que la composante verticale, mais la hauteur relative entre les étages est inconnue. En se basant sur ces informations, l'Espagne a produit une représentation 3D des bâtiments. Cette représentation 3D est reconstruite dans le format « KML » et visualisée dans Google Earth. Grâce aux plans d'étages, il est également possible de reconstruire le modèle 3D détaillé de l'intérieur du bâtiment.



Identification des sous-parcelles sur le plan cadastral



Représentation 3D des sous-parcelles

Figure 2 : Identification des sous-parcelles sur le plan cadastral et Représentation 3D des sous-parcelles

La hauteur réelle des étages et les composantes de bâtiment ne sont pas enregistrées dans le système cadastral de l'Espagne. Cette hauteur est fixée à trois mètres pour chaque étage et considérée pour la reconstruction du bâtiment en 3D.

En prenant compte de la nature des autres éléments de l'architecture d'un bâtiment, une hauteur standardisée est considérée. Par exemple, les terrasses sont fixées à une hauteur de 1.5 mètre. Le modèle 3D reconstruit n'est donc pas une représentation 3D précise du bâtiment.

Les systèmes précédents sont de types hybrides puisqu'ils intègrent la troisième dimension de diverses façons mais restent basés sur les parcelles en 2D.

Les limitations de ces systèmes ne répondent plus au besoin des situations actuelles. Des situations de débordements, des bâtiments ayant des géométries complexes, l'augmentation des situations de superpositions, les besoins de données fidèles à la réalité, les prises de décisions de la part des pouvoirs publics nécessitent de nouveaux systèmes cadastraux.

### *3) Cas du Cadastre québécois*

Le cadastre québécois est un registre public. Il est formé par deux éléments : le plan et le registre foncier. Le plan cadastral est un outil graphique qui permet de représenter les immeubles sur lesquels s'exercent les droits réels immobiliers ainsi que leurs immatriculations.

Dans le cas des propriétés distinctes et superposées, les différents lots doivent avoir des limites définies à la fois horizontalement et verticalement afin de pouvoir situer chacun de ces lots par rapport à ceux qui l'entourent.

L'élément tridimensionnel associé aux lots de cadastre vertical fait en sorte que ces lots ne peuvent être représentés sur le plan cadastre global. On utilise alors un plan complémentaire. Le plan cadastral complémentaire est spécifié sur le plan cadastre global par des lettres « PC » suivie d'un nombre de 5 chiffres comme on peut le voir sur l'illustration ci-dessous. Cette numérotation est unique pour le Québec :

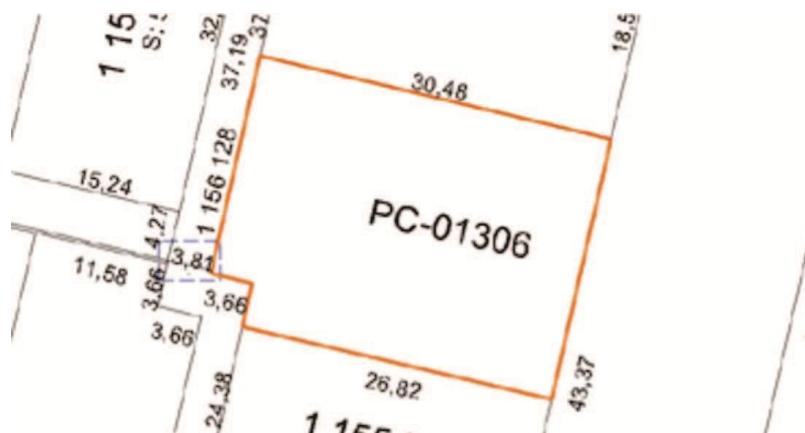


Figure 3 : Plan cadastre global

Le cadastre Vertical se compose d'un plan cadastral parcellaire suivi d'un plan cadastral complémentaire. Le plan cadastral parcellaire (cf. annexe 1) permet d'établir un lien entre le plan cadastral complémentaire et le plan cadastral global puisque ce sont les données du plan parcellaire qui seront intégrées au plan global.

Le plan cadastral complémentaire se compose de plusieurs éléments obligatoires qui sont les suivants :

- La localisation qui permet de situer la copropriété en montrant les lots sur lesquels se trouve la copropriété ;
  - Une ou plusieurs coupes favorisant la localisation verticale des lots. L'altitude géométrique ainsi que les hauteurs sous plafonds y sont notamment indiquées ;

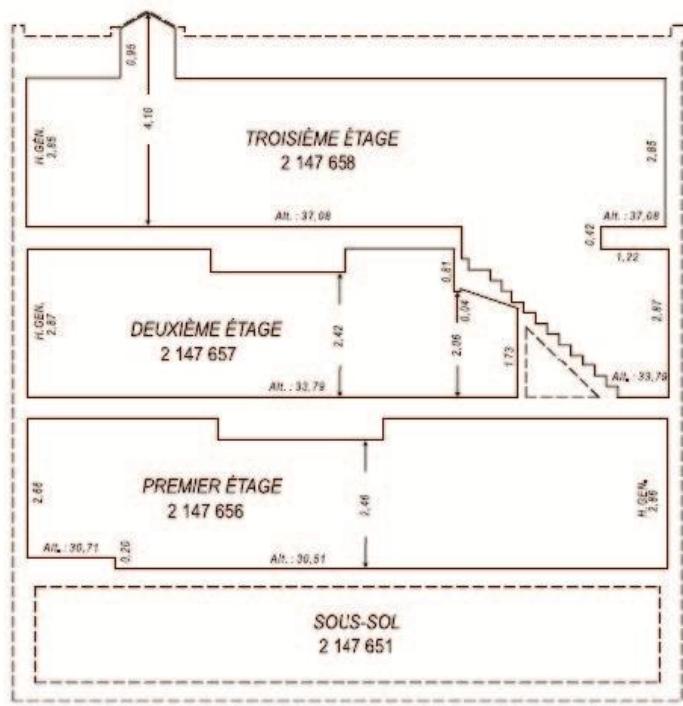


Figure 4: Coupe d'un plan par étage

- Des plans par étages sur lesquels on retrouve les superficies, les volumes ainsi que les numéros des lots de la copropriété.

Ces différents éléments du plan complémentaire sont représentés sur un ou plusieurs feuillets suivant le nombre d'étages à représenter. Ce plan cadastral complémentaire est stocké sous forme de documents images en format PDF.

#### 4) Cas du Pays-Bas

L'enregistrement cadastral Néerlandais appelé le «Kadaster» est maintenu par une autorité administrative indépendante sous la responsabilité politique du Ministre de l'Infrastructure et de l'Environnement des Pays-Bas. Le cadastre Juridique est utilisé pour l'appui de l'immatriculation des droits fonciers et de la délimitation du droit de propriété. Il maintient l'enregistrement cadastral comprenant l'enregistrement des limites des parcelles et l'enregistrement du statut juridique qui sont enregistrés dans des actes notariés. Ces actes sont archivés dans l'ordre chronologique disponible sous format numérique.

Au Pays-Bas, le statut juridique de propriété superposée est défini par le droit de copropriété ou le droit de superficie. Selon l'article 106 du code civil Néerlandais, le droit de copropriété est la situation dans laquelle un propriétaire a le droit d'utiliser une ou plusieurs parties d'un immeuble. Le droit de superficie, selon l'article 101 du Code Civil néerlandais, est défini comme étant le droit d'utiliser une construction sur une propriété. Le plan cadastral est une représentation graphique 2D des limites et des numéros de parcelles, des frontières de bâtiments, des noms de rues et des numéros d'immeubles. Les parcelles sont représentées sous forme de polygones fermés.

Dans le cas des propriétés superposées, les empreintes apparaissent sur le plan cadastral 2D. Cette empreinte est définie comme étant l'intersection de l'objet 3D avec la surface 2D au sol. Les limites des parcelles sont représentées par des lignes plus foncées et les empreintes des bâtiments sont illustrées par des lignes moins foncées. L'acte de division dans un cas de copropriété contient un dessin 2D appelé plans de division. Ils sont composés d'une vue en profil et des plans d'étages pour décrire les limites des propriétés. Ces plans de division sont enregistrés dans le registre public et représentent un aperçu général de la parcelle et des bâtiments. Ils illustrent l'emplacement vertical des unités d'appartement par une vue en profil ainsi que la subdivision de chaque étage en utilisant des plans d'étages.

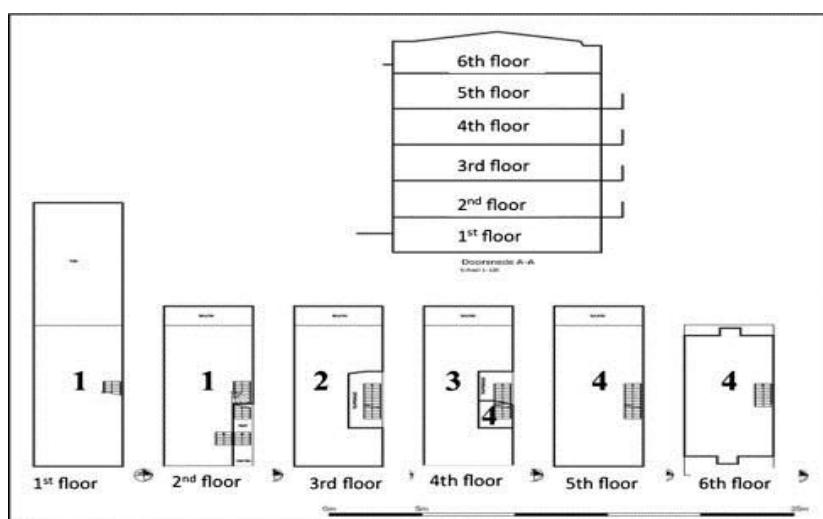


Figure 5: Plans de division de Pays-Bas

Dans le système cadastral du Pays-Bas, aucune information 3D ne figure sur les plans de division. Par contre, les plans d'étages décrivent les limites horizontales des unités d'appartements et la vue en profil montre leurs positionnements verticaux.

### *5) Synthèse des quatre systèmes cadastraux examinés*

Afin de résumer ces quatre systèmes cadastraux, le tableau ci-après en montre une synthèse selon cinq éléments jugés importants de mettre en évidence [Abbas 2014].

		Représentation cadastrale dans le cas de copropriétés			Représentation de la dimension verticale des copropriétés		Enregistrement des coordonnées 3D	
		Symbolique indiquant la présence des copropriétés sur le plan cadastral	Représentation de la composante verticale	Informations 3D disponibles	En annexe du plan cadastral	Sur le plan cadastral	Relative	Absolu
Québec	Annotation	Plans et coupes 2D	-Le volume d'unité de propriété - L'altitude - La hauteur relative entre les étages	X		X	X	
Pays-Bas	Empreinte	Plans et coupes 2D	- aucune information 3D représentée sur les plans de division	X		Pas de directives		
Australie : Queensland	Empreinte	Plans et coupes 2D Vues isométriques	- Le volume d'unité de propriété - L'altitude de coins de surfaces non horizontales sur le plan volumique	X	X			X
Espagne	Annotation	Volumes parallélépipédiques	- Hauteurs standardisées pour les étages et des composantes de bâtiments lors de la reconstruction du modèle 3D de bâtiments		X		Pas de directives	

Tableau 1 : Synthèse de représentation cadastrale dans le cas de copropriétés aux systèmes cadastraux du Québec, du Pays-Bas, du Queensland et de l'Espagne

## CHAPITRE II : Généralités sur l'immatriculation des appartements à Madagascar

### Madagascar

L'immatriculation des immeubles à Madagascar existait dès l'élaboration du code foncier. C'est le décret n°50-1631 du 27 Décembre 1950 portant sur le règlement du statut de la copropriété des immeubles divisés par appartement à Madagascar qui régit le système de copropriété à Madagascar. Le présent décret est applicable uniquement pour les bâtiments à plusieurs niveaux à différents appartements [Mada 01].

Ce système est appliqué surtout par les Sociétés immobilières. Il n'est pas vraiment connu à Madagascar par l'insuffisance des demandeurs. Peu nombreux sont les géomètres experts qui traitent ce genre de projet. Ainsi, plusieurs géomètres experts restent dans l'ignorance de l'existence de ce projet. D'autres l'ont déjà entendu, mais n'ont jamais assisté à une descente sur terrain. Ce projet est dit « Démembrement ». On va donc voir en premier le système du Démembrement et les éléments mis en jeu.

#### I. Démembrement

##### 1) Définition

Le démembrement consiste à séparer le droit de propriété en deux parties distinctes : l'usufruit et la nue-propriété.

L'usufruit est le droit de jouir des choses d'un autre comme le propriétaire lui-même, mais à condition d'en conserver la substance. L'usufruit donne le droit de jouissance du bien, c'est-à-dire de l'habiter ou de le louer pour en percevoir les fruits. La nue-propriété permet de disposer du droit de partager le bien, c'est-à-dire de le vendre. Ces droits de propriété sur les fruits et revenus sont défait temporairement et sans compensation ultérieure.

##### 2) Système de Démembrement

Ce système de démembrement est un système foncier équivalent à un travail de bornage, mais dans le cas de copropriété. Les travaux de démembrement consistent à séparer son bien des autres s'il se trouve dans une propriété commune. Par exemple dans un bâtiment à plusieurs appartements à différents propriétaires.

Selon le régime foncier, il est établi par voie de morcellement du titre foncier original, des titres fonciers distincts relatifs à chaque fraction d'appartement à un copropriétaire de l'immeuble. Un titre foncier spécial est établi également au nom de l'usufruitier.

Les actes constitutifs de droit de propriété, les plans architecturaux de l'appartement sont déposés à la conservation de la propriété foncière. Sur le plan du rez-de-chaussée figure une échelle verticale de hauteur d'étage. Chacun des plans est affecté par des numéros distincts et définitifs relatifs à chaque appartement ou étage.

Evidemment, il n'y a aucun bornage sur les fractions divisées de l'immeuble, mais il est dressé un procès-verbal descriptif des parties indivises communes et un procès-verbal détaillé de chaque fraction divisée. Les surfaces des fractions données par ces plans, ainsi que leur hauteur d'après l'échelle verticale sont mentionnées avec la superficie du terrain où l'immeuble a été édifié.

Il est établi dans les mêmes conditions, pour être annexé au titre parcellaire, un plan des parties indivises communes comportant toutes coupes nécessaires, ainsi qu'un plan de la fraction divisée des objets de ce titre avec coupes et échelle verticale de hauteur correspondante. Sur le titre original, on mentionne chaque partie divisée par des noms personnalisés par les propriétaires.

En général, il est constitué par :

- Le Procès-Verbal de démembrément
- La réquisition individuelle de l'appartement ou l'étage
- Le Plan architectural de l'appartement ou de l'étage
- Le titre foncier du bâtiment
- L'acte de vente entre l'acheteur et le vendeur
- La note de vérification par l'agent vérificateur

Ces dossiers sont classés dans un carton chemise et archivés au sein de la Direction des Services Topographiques. Ils ne sont pas reproduits numériquement.

### *3) Travail en démembrément*

#### *a) Travail sur Terrain*

Sur terrain, si le plan architectural du bâtiment n'existe pas, le géomètre est avisé de mesurer à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Chaque chambre devra être mesurée une par une. Si le propriétaire a un plan architectural, le géomètre vérifie juste les mesures écrites. Pour un bâtiment à niveau (r+1), on mentionne juste le numéro de l'étage où se situe la parcelle à démembrer.

#### *b) Travail au bureau*

En général, la phase de déroulement d'un dossier de démembrément est presque la même que celle d'un projet de bornage étudié au sein du service.

## II. Les parties prenantes

Les acteurs qui entrent en jeu dans ce système sont les sociétés immobilières ainsi que les copropriétaires.

### 1) Sociétés de construction

Ce sont les grandes sociétés de construction qui appliquent en général ce système à Madagascar. Elles ont pour objet de construire ou d'acquérir des immeubles en vue de les diviser en étages ou en appartements destinés à être attribués aux associés ou aliénés à des tiers, en propriété ou en jouissance, soit la gestion et l'entretien de ces immeubles ainsi divisés. Ces immeubles divisés seront hypothéqués ou vendus par des gens intéressés. Par exemple, à Madagascar SEIMAD occupe la première place pour l'application de ce système. Il dispose déjà de plusieurs bâtiments qui régissent ce système.

### 2) Copropriétaires des immeubles

#### a) Propriété commune

Lorsque les différents étages ou appartements d'un immeuble appartiennent à divers propriétaires, ils sont présumés copropriétaires du sol et de toutes les parties des bâtiments tels que les cours, les murs, les toitures, les planchers, les escaliers et ascenseurs, les planchers, le loge du concierge, les passages et corridors, les appareils de climatisation et les canalisations de toutes sortes ainsi que les cloisons séparatifs de deux appartements sont considérés comme des propriétés communes. Chacun des propriétaires peut user librement des parties communes suivant sa destination et sans faire obstacle aux droits des autres propriétaires. Il est tenu de participer aux charges de la conservation de l'entretien et de l'administration de ces parties communes.

#### b) Choix du syndicat

Les propriétaires se trouvent dans l'obligation de former un groupe de syndicat. Ce syndicat sera leur représentant légal devant la justice. Ce sont ces groupes qui interviennent en premier en cas de conflit. Ce syndicat des copropriétaires peut établir ou modifier un règlement. Ce règlement doit être accepté par au moins trois quarts des voix des membres du syndicat. Par majorité des voix, le syndicat peut imposer toutes assurances collectives ou individuelles relatives aux risques qui menacent l'immeuble ou les copropriétaires. Il est chargé de l'exécution des décisions de l'assemblée, à la garde et à l'entretien de toutes les parties communes. Le syndicat est nommé à la majorité des voix sur une requête de l'un des copropriétaires par une ordonnance du président du tribunal de première instance ou du juge de paix à compétence étendue.

### c) Cas de destruction

En cas de destruction par incendie ou d'autres facteurs de destruction, les copropriétaires seront tenus de se conformer à la décision qui sera prise par le syndicat des propriétaires. Si le syndicat décide une reconstruction, les indemnités représentatives de l'immeuble détruit seraient sous réserve des droits des créanciers inscrits affectés par la reconstruction.

### d) Autres cas

Si plusieurs fractions de l'immeuble deviennent la propriété d'une même personne, la fusion des titres fonciers distincts peut être requise pour former un bloc. Si tout l'immeuble devient la propriété d'une seule personne, la fusion de tous les titres parcellaires avec le titre original peut être requise. Ainsi, le syndicat des copropriétaires créé n'existe plus.

## RESUME

Dans notre pays, seule Antananarivo répertorie les informations cadastrales en format numérique (plan numérique). Ces informations sont incomplètes puisqu'elles ne représentent que la parcelle 2D alors que le cadastre est une parcelle de base contenant les limites foncières existantes dans un pays.

La question qui se pose est que si l'enregistrement cadastral traditionnel basé sur le concept d'une parcelle 2D est suffisant pour enregistrer toute sorte de situation qui se produise dans le monde moderne où l'enregistrement cadastral a besoin d'évoluer vers une approche 3D. D'autres critères comme la densité des constructions des bâtiments, la forte densité de la population font installer la superposition de propriété ou le système de copropriété. Comme plusieurs cas l'ont démontré, les propriétés superposées de nature tridimensionnelle ne peuvent pas être représentées en deux dimensions. Ce qui aboutit à la nécessité d'un cadastre 3D. La mise en place d'un cadastre en 3D serait alors utile et serait appréciée seulement dans certains contextes créés par la complexité des situations. Ainsi, dans un environnement profondément rural, il est évident que sa mise en place n'est pas prioritaire. A l'inverse, en milieu urbain, la rareté du terrain et les difficultés d'accès à la propriété encouragent fortement ce besoin.

Cependant, il existe des méthodes requises pour la réalisation de ce système tridimensionnel. Les systèmes aéroportés tels que la photogrammétrie numérique ou le LiDAR offrent une solution pour l'acquisition des données géographiques en trois dimensions. Dans notre cas, on a choisi un système de photogrammétrie aérienne puisqu'on possède les données nécessaires pour réaliser un prototype cadastre 3D à Madagascar notamment sur le cas de la copropriété. Notre objectif principal se basera donc sur la modélisation des bâtiments en 3D en milieu urbain. Effectivement, les autres détails tels que la végétation ou les autres éléments du sol tels que les chemins de fer ou les routes sont utilisés dans une autre application cadastrale telle que le cadastre RDPPF ou Restriction des Droits Public à la Propriété Foncière.

---

## PARTIE II : TECHNIQUE D'ACQUISITION

---

*On développera dans cette deuxième partie deux chapitres qui parleront du système de photogrammétrie numérique et du système de LiDAR aéroporté pour son apport en 3D. Le but est de voir dans chaque méthode, l'apport des données pour reconstruire le système cadastre 3D. Il est important de noter que l'étude sera basée en milieu urbain, là où le besoin en cadastre 3D se fait ressentir.*

# CHAPITRE I PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE

Dans ce chapitre, il est nécessaire avant tout d'invoquer une notion générale sur la photogrammétrie numérique afin de mieux s'orienter sur le sujet. Par la suite, on parlera de la modélisation 3D en photogrammétrie pour la constitution des données en 3D utilisables pour une gestion de cadastre 3D. Enfin, on va détailler les spécifications des levés photogrammétriques en vue de constituer des données cadastrales 3D.

## I. Notion générale

### *1) Définition*

La photogrammétrie est une technique de mesure pour laquelle les coordonnées altimétriques et planimétriques d'un objet sont déterminées par des mesures faites en deux images photographiques (ou plus) prises à partir de positions différentes. Le nom de photogrammétrie est dérivé du nom « phosphore » ou « phot » trois mots grecs qui signifie lumière, « gramma » qui signifie « lettre » ou quelque chose « dessinée », et « metrein » qui est le nom de la mesure [Wiki 2012].

Dans cette technique, les points communs sont identifiés sur chaque image. Un couple d'image doit avoir ces points communs. Une ligne de vue peut être construite de la position de l'appareil photographique au point de l'objet. C'est l'intersection de ses rayons qui détermine la position tridimensionnelle du point.

### *2) Principe général*

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.

Pour le cas de la photogrammétrie aérienne, un avion équipé d'une chambre de prise de vue vole au-dessus d'une région, de façon qu'une partie du terrain figure sur deux clichés correspondant à deux positions différentes de l'avion [Chandelier 2011].

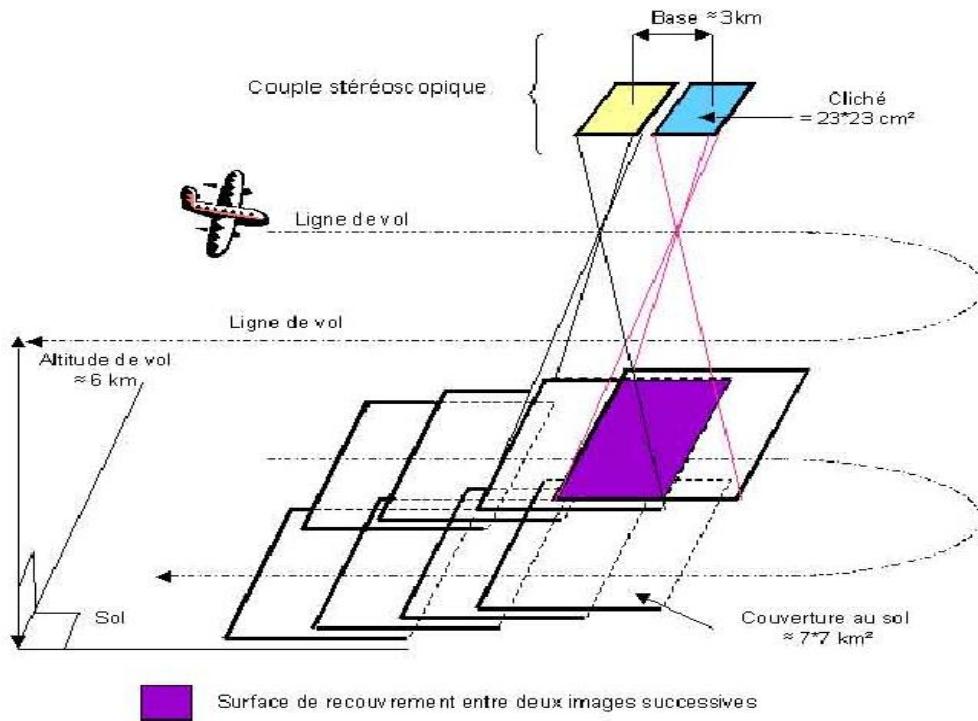


Figure 6 : Exemple de prive de vue

Si on observe simultanément un cliché avec un œil et le second avec l'autre œil grâce à un outil optique approprié (stéréoscope à miroirs, appareil de restitution, ordinateur équipé de lunettes spéciales, etc.), on voit en relief la zone de terrain vue sur les deux images. La vision humaine permet en effet de voir en relief dans une large gamme de dispositions relatives de ces deux images. Si nous disposons de ces dernières dans une position relative exactement semblable à celle qu'elles avaient au moment de la prise de vue, alors l'image stéréoscopique observée est une exacte homothétie du terrain réel photographié, pour autant que la chambre de prise de vue soit parfaite ou que l'image ait été corrigée de sa distorsion. Pour exploiter alors cette scène stéréoscopique, l'appareil de restitution superpose à chaque image un point que la vision humaine comprendra comme un petit objet dont la position est déplaçable à volonté en hauteur au-dessus de l'image du terrain grâce à des commandes appropriées. L'opérateur aura donc pour travail de promener ce ballonnet dans l'image sur tous les objets à mesurer, pendant que l'appareil archivera toutes les informations numériques produites. Pour que l'image observée soit une copie exacte de l'objet mesuré, il faut contraindre un certain nombre de points dans l'image en les obligeant à être à des positions relatives similaires aux objets. En reprenant la définition, la photogrammétrie est le passage de deux modèle 2D du paysage à un modèle 3D. Notons qu'un objet doit être mesuré au moins deux fois en 2D pour être restituables en 3D.

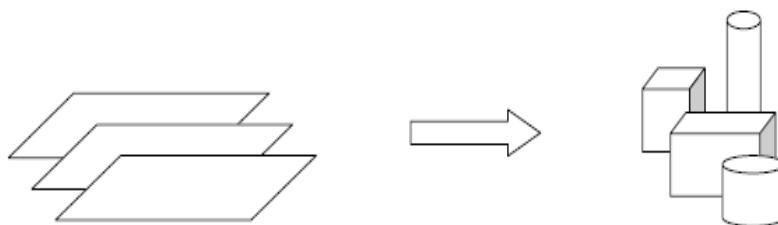
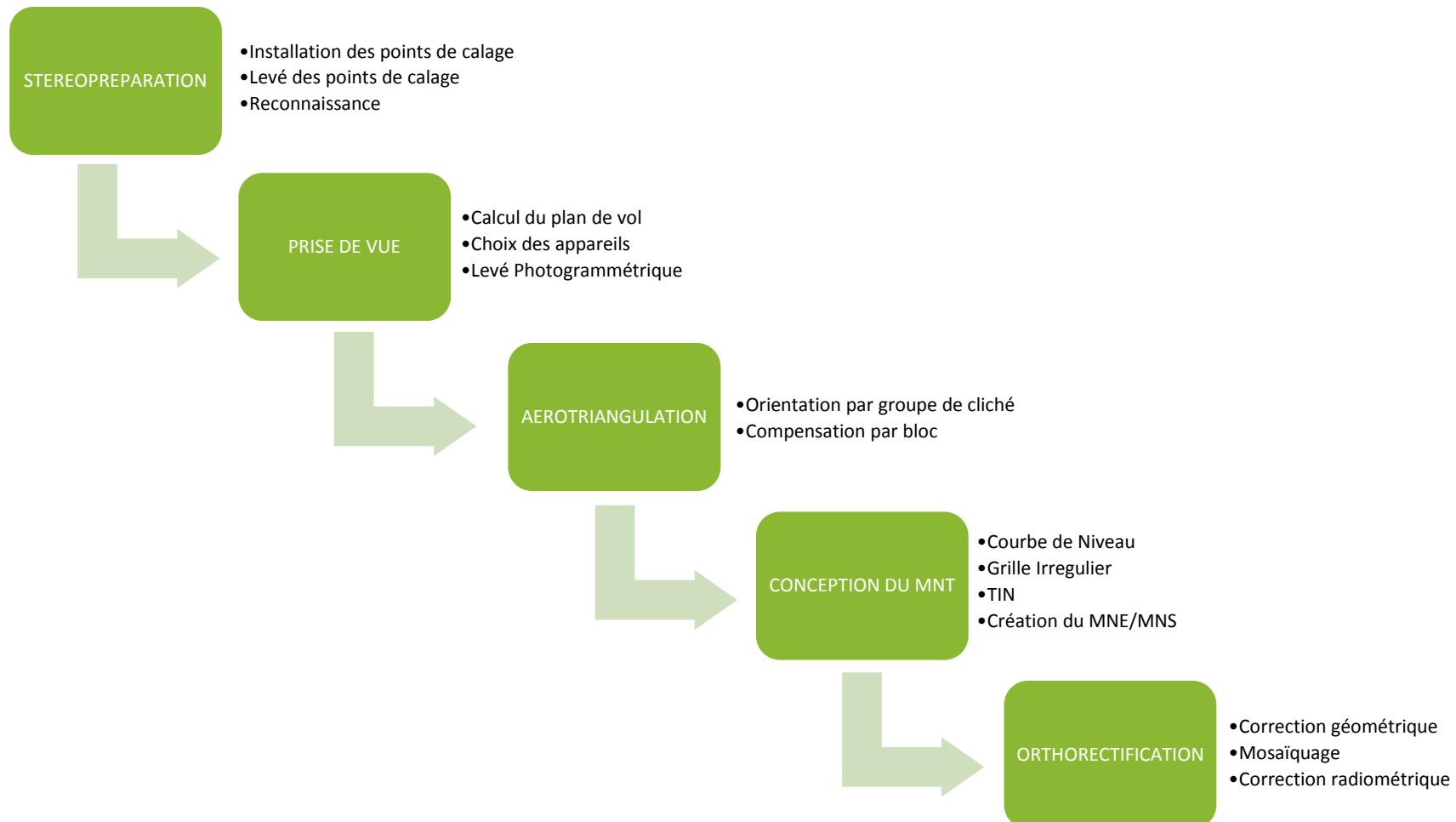


Figure 7 : De l'objet 2D (photographies) aux objets 3D

### 3) Processus de traitement en photogrammétrie



Cette figure illustre l'étape de traitement des photos en mode photogrammétrie numérique. Il est inséré dans l'annexe n°3 quelques images qui nous permettent un peu de s'orienter sur la spécification de chaque étape citée ci-dessus.

## II. Spécification des levés photogrammétiques

Avant d'entamer une notion sur la modélisation 3D des données photogrammétriques, il faut tout d'abord voir les spécifications des levés photogrammétriques en vue de constituer des données cadastrales 3D fiables. Ces spécifications sont les caractéristiques d'une prise de vue, le choix de la focale et la résolution spatiale. La résolution de l'image d'où la qualité des données à modéliser 3D dépend donc de ses facteurs.

### 1) Prise de vue

On peut déterminer la qualité d'une prise de vue à partir des échelles d'une photographie aérienne, de la prise des dévers et du rapport de la base sur la hauteur de vol

#### a) Echelle

Il existe différents types de formules permettant de calculer l'échelle d'une photographie aérienne [Wolf & Dewitt 2000].

Sur terrain plat, il existe une expression de l'échelle en fonction de la focale de la caméra photogrammétrique et de la hauteur de vol :

$$ECHELLE = \frac{DISTANCE FOCALE}{HAUTEUR DE VOL}$$

Sur un terrain accidenté :

$$ECHELLE_{moyenne} = \frac{DISTANCE FOCALE}{HAUTEUR DE VOL - h_{moyen}}$$

Où  $h_{moyen}$  est la hauteur moyenne de la zone du projet par rapport à l'ellipsoïde de référence. D'autres relations donnent accès au calcul de l'échelle d'une photographie verticale, même en l'absence des informations de focale et de hauteur de vol :

$$ECHELLE_{moyenne} = \frac{distance mesurée sur la photo}{distance mesurée sur terrain}$$

Il sera souvent plus simple de mesurer la distance sur terrain sur une carte à l'échelle. Dans ce cas, la relation devient :

$$S = \frac{\text{distance mesurée sur la photo}}{\text{distance mesurée sur terrain}} \times \text{échelle de la carte}$$

Ces formules sont élaborées par des chercheurs spécialistes en photogrammétrie aérienne [Wolf & Dewitt 2000].

### b) Dévers

Les projections employées par les capteurs photographiques présentent l'inconvénient de créer un effet de dévers sur les clichés aériens. Les capteurs matriciels engendrent des dévers à la fois latéraux et longitudinaux. Ce phénomène de dévers est nul au centre du cliché c'est-à-dire au nadir de la prise de vue, mais croît en s'éloignant et lorsque les objets présentent une différence de relief.

Les dévers également appelés « déplacements dus au relief », sont particulièrement gênants en ville où les bâtiments les plus hauts obstruent des éléments alentours.

La société prestataire peut proposer trois solutions pour atténuer ce phénomène. Il faut :

- N'utiliser que la zone centrale de chaque cliché qui est la moins soumise aux dévers. Cela implique par contre de choisir un recouvrement plus important ;
- Augmenter la hauteur de vol pour réduire l'effet de perspective ;
- Effectuer une orthorectification vraie en projetant verticalement les objets du sol (bâtiments, ouvrages d'art, végétation, ...) sur un Modèle Numérique de Surface (MNS)

Le dévers s'exprime en pourcentage en utilisant successivement les relations (1) et (2) suivantes [Wolf & Dewitt 2000]. Soit le dévers latéral maximal  $d_{lat}$

$$d_{lat} = \frac{(1 - \text{recouvrement latéral}) \times \text{emprise transversal du cliché au sol}(m)}{2 \times \text{Hauteur de vol}}$$

(1) Le dévers longitudinal maximal  $d_{long}$  :

$$d_{long} = \frac{(1 - \text{recouvrement longitudinal}) \times \text{emprise longitudinal du cliché au sol}(m)}{2 \times \text{Hauteur de vol}}$$

(2) Le dévers total maximal d :

$$\sqrt{d_{lat}^2 + d_{long}^2}$$

### c) Etude du rapport base sur hauteur

Le rapport base sur hauteur est un facteur important en photogrammétrie. Il caractérise la précision de mesure des hauteurs et profondeurs de la restitution photogrammétrique [Chandelier 2011]. En effet, comme il est schématisé sur la figure 9, la reconstruction du modèle tridimensionnel en

altimétrie est fonction de définition approximative de l'intersection des rayons du couple de photographies, pointant sur le même objet.

Plus ce rapport B/H est grand, plus la précision de détermination des altitudes des points est meilleure. La formule permettant de le déterminer est :

$$\frac{B}{H} = \frac{(1 - recouvrement\ longitudinal\ en\ %) \times longueur\ de\ l'emprise\ du\ cliché\ au\ sol}{Hauteur\ de\ vol}$$

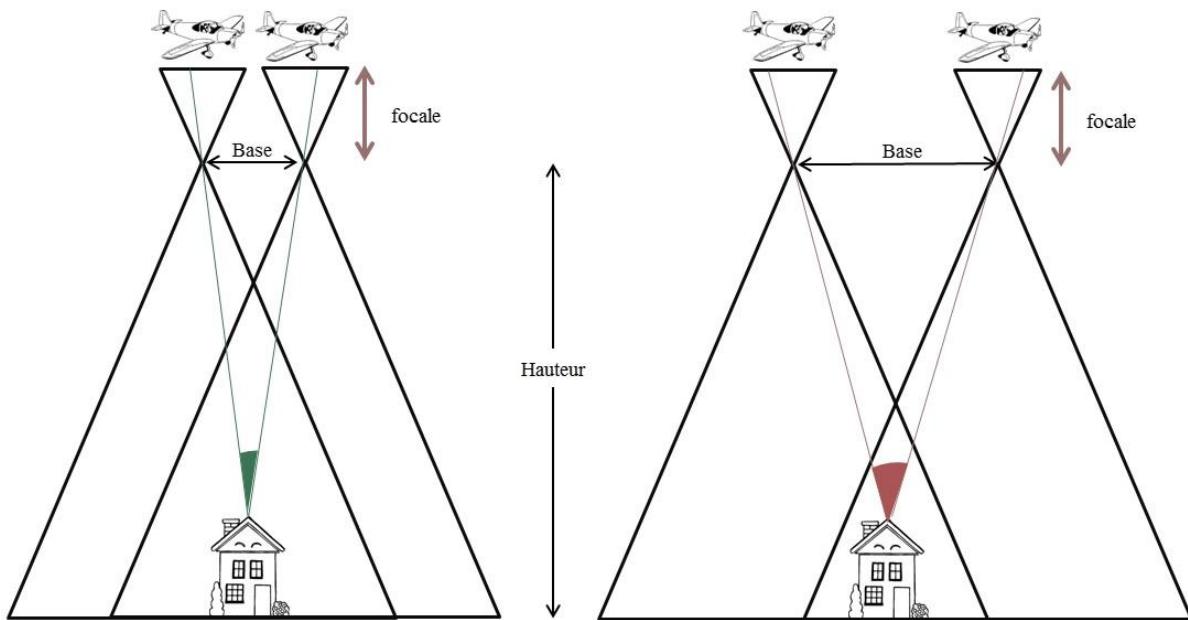


Figure 9: Schéma illustrant l'angle d'intersection au niveau d'un point de détail en fonction du rapport B/H. L'intersection rouge fournira une meilleure détermination de Z que la verte

## 2) Choix de la focale

### a) Notion générale sur la focale

Le choix de la focale dépend de la finalité de la photographie. Historiquement, les focales les plus courantes étaient celles de 152 mm ou de 305mm dites « grand-angle ». Depuis l'apparition du numérique, on trouve majoritairement des caméras à focales plus courtes comprises entre 50 et 100mm. Une focale courte respecte la précision géométrique, notamment en altimétrie. La figure 10 démontre qu'à une hauteur de vol équivalente, plus la focale est petite, plus l'angle de champ de vision est important [Wolf/Dewitt 2000]. Par contre, dans une telle configuration, la taille du pixel au sol ou GSD (Ground Sample Distance) en anglais, sera plus petite dans le cas d'une longue focale : on parle alors de meilleure résolution spatiale. En d'autres termes, on retiendra qu'une focale plus courte autorise un vol à plus basse altitude, favorisant ainsi une meilleure définition du pixel au sol.

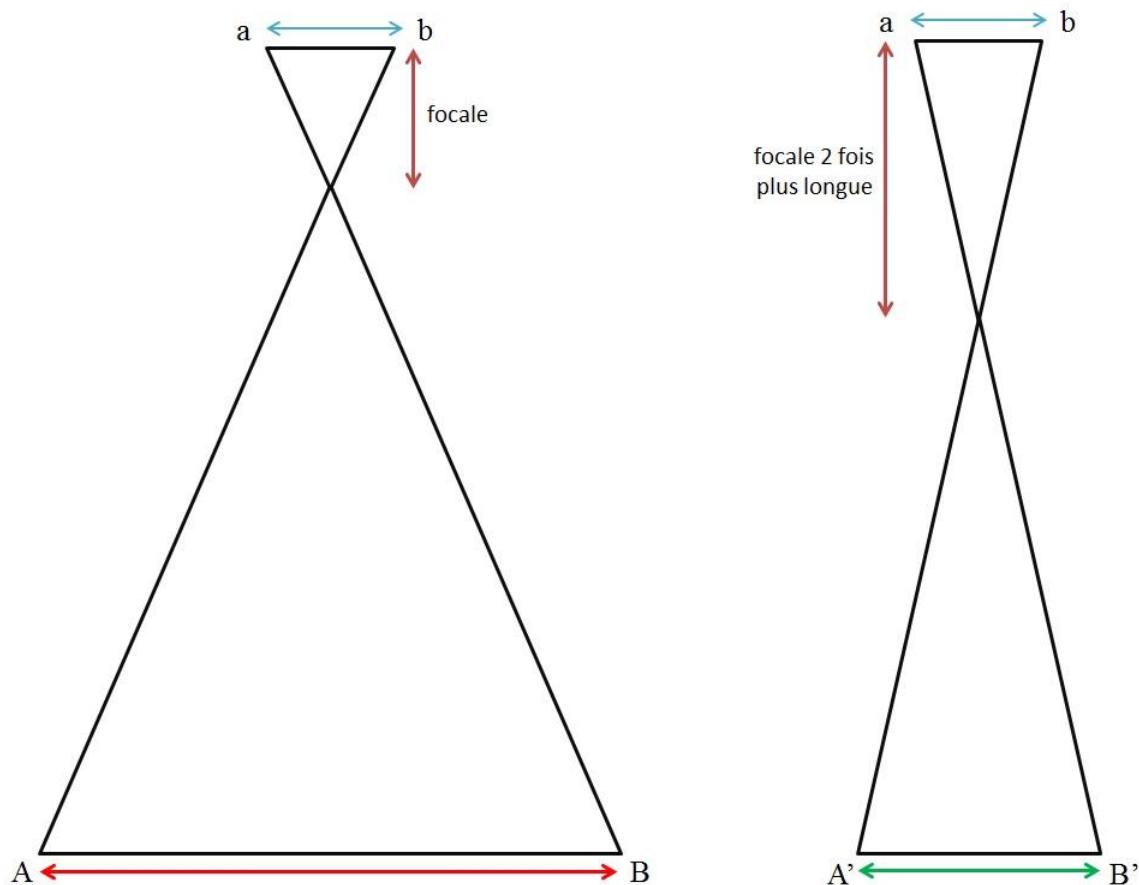


Figure 10 : Type de focale

L'opérateur doit être averti qu'au sein d'un même cliché peuvent subvenir des variations de l'échelle pour un cliché argentique ou de la résolution spatiale pour une photographie numérique. En effet, la résolution spatiale diminue quand l'échelle augmente ou que lorsque le relief est plus haut comme l'illustre parfaitement la figure ci-après

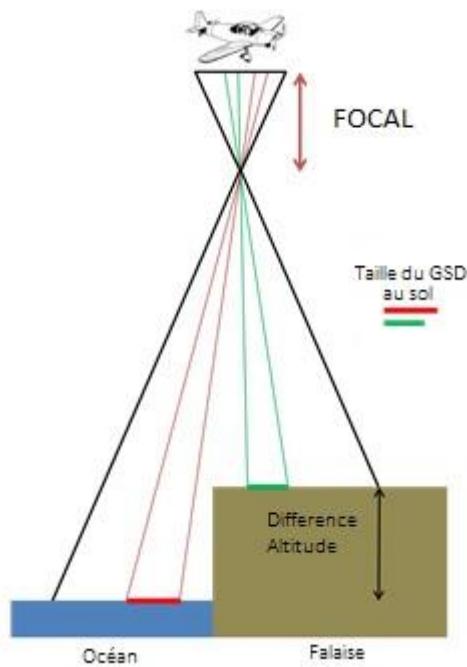


Figure 11 : représentation de la taille du GSD

Autrement dit, pour respecter une résolution spatiale imposée, il faudra calculer la hauteur de vol au niveau le plus bas du chantier, ou si la topographie du terrain est connue, adapter les altitudes de vol pour chaque axe.

Souvent confondue avec la résolution spatiale, la précision géométrique en photogrammétrie, correspond à la précision du positionnement de chacun des pixels de l'image sur le terrain. Puisque chaque projet photogrammétrique est différent, on devra choisir une résolution spatiale cohérente vis-à-vis de la précision attendue pour le projet [Berru 2012].

Echelle	G.S.D. (en cm)	Classe de précision (en cm)	
		planimétrie	altimétrie
1/500	4 - 6	06 - 09	08 - 12
1/1000	6 - 10	09 - 15	12 - 20
1/2000	10 - 15	15 - 22	20 - 30
1/5000	15 - 35	22 - 52	30 - 70

Tableau 2 : classe de précision en fonction de l'échelle et du GSD

Dans l'étude d'un cadastre 3D qui prend en compte la qualité de la géométrie, l'utilisation d'une focale courte devrait être exigée.

### b) Type de caméra

Il existe deux types de caméras photogrammétriques : les caméras argentiques et les caméras numériques. Actuellement, les photographies aériennes sont prises directement en mode numérique avec des caméras numériques aéroportées. Ces images numériques aéroportées sont prises, à la manière des images satellites par des détecteurs électroniques. Aussi, tout comme les images satellites, leur précisions sont données en termes de résolution et non d'échelle. Par ailleurs, ces caméras prennent simultanément des images panchromatiques (en noir et blanc) et des images couleurs qu'on dit aussi multispectrales (en rouge, vert et bleu). De plus, les bandes chromatiques sont généralement de meilleures précisions.

Le grand avantage de l'utilisation des caméras numériques aéroportées réside dans le fait qu'il n'y a pas de pellicule, donc pas d'opération de développement. De plus, la photo n'a pas besoin d'être scannée pour produire une image numérique et elle est plus facile à stocker. Enfin, ces images ont de grandes qualités, puisqu'elles sont à la fois en bonne résolution en noir et blanc et en couleurs.

Par la diversité des détails en milieu urbain, l'utilisation de ces caméras numériques s'avère alors un bon choix tant qu'économique que technique pour l'acquisition des données.

### c) exemple de caméra numérique

On prendra comme exemple de caméra numérique le type UltraCam. Il est composé par :

- Un capteur maître qui est caractérisé par 4 CCD (charge couple device)
- 4 gaps qui remplissent les caractères de l'image
- 4 cônes qui capturent la couleur

L'UltraCam produit des images couleurs à une résolution de 7500 x 11500 pixel. L'image couleur vraie a une résolution de 2400 x 3680 pixel. La caméra numérique UltraCam numérise à  $9\mu\text{m}$  soit de l'ordre de  $10^{-4}$  cm.

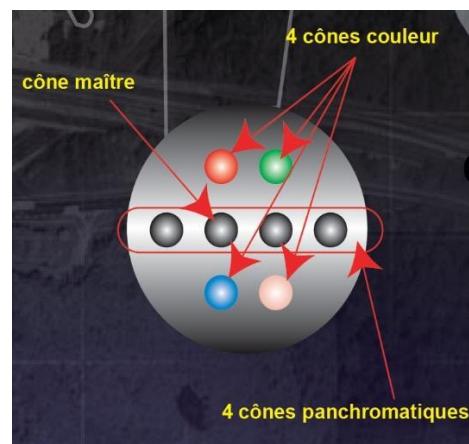


Figure 12 : Caméra numérique UltraCam

Ce type de caméra numérique serait alors idéal pour une prise de vue en milieu urbain.

### 3) Résolution spatiale

#### a) Notion de résolution spatiale

La notion de résolution spatiale correspond, pour une image numérique, à la taille équivalente sur le terrain du côté d'un des photosites. Le terme «spatiale» est bien souvent négligé. La définition qui veut que la résolution d'une image numérique soit la distance sur le terrain d'un pixel, semble la plus appropriée. De plus, un objet devrait au minimum être composé d'un groupe de 4 à 9 pixels afin d'être identifiable [Chandelier 2011].

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

Il n'existe pas de formule irréfutable pour déterminer la résolution spatiale d'une photographie sur un film argentique. Ce qui favorise l'utilisation des techniques numériques [Clark 2008]. Par contre, pour une image argentique scannée, la résolution a un sens :

$$\text{Résolution spatiale} = \text{échelle du cliché argentique} \times \text{pas du scanner}$$

Il faut bien comprendre qu'une image numérique dispose d'une résolution originale qui ne varie pas en fonction de l'échelle de l'affichage.

#### b) 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.

### 4) Synthèse générale

Parmi des diverses recherches pour l'obtention d'un couple stéréoscopique à haute résolution, on prendra comme exemple une type de prise de vue effectuée dans la partie de la ville de Colombes en banlieue parisienne qui s'avère être une bonne prise de vue en milieu urbain [Cord 1998].

Les photographies aériennes traitées sont prises en verticale à une altitude d'environ 900m. Elles couvrent une partie de la ville de Colombes en banlieue parisienne. Deux images consécutives, présentent une zone de recouvrement d'environ 60% et constituent ainsi un couple stéréoscopique. Les conditions d'éclairement pour ces deux images peuvent être considérées comme semblables. Les deux prises de vue étant séparées de quelques dizaines de secondes. La résolution de ces images est de 8 cm. L'échelle de prise de vue est de 1/4000 et une numérisation à 9µm. Ces images sont d'une résolution fine pour que des détails relatifs aux structures des bâtiments apparaissent clairement. Cet exemple serait alors nécessaire pour avoir une structure 3D pour des applications cadastrales.

### III Modélisation 3D en Photogrammétrie

#### 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 du foncier.

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 une reconstruction d'un système de cadastre 3D basé sur la copropriété. On se basera donc sur les modèles des bâtiments 3D.

#### 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 obtenue 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 recoupement 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 un système cadastral en 3D.

### **3) Photographie aérienne des zones urbaines**

La modélisation des zones urbaines est caractérisée par des bâtiments à formes diverses, des réseaux de voie de communication dense et la présence d'ilots de végétation. La diversité de la forme des objets, en particulier des toits des bâtiments rend complexe la forme de la surface 3D visible de la scène. Ce qui exige une haute résolution des images aériennes qui doit être supérieure à 15 cm. Ce résultat est constaté durant la cartographie des villes de la France par l'IGN [IGN 05]. L'extraction et la modélisation des objets de la scène sont compliquées mais avec des images riches et bien texturées, la modélisation des différents objets sera plus facile.

Pour traiter ces images en zones urbaines composées de plusieurs détails, il existe deux grandes étapes : la classification bâti-sol-végétation et la reconstruction des bâtiments [Cord 1998].

#### **a) Classification bâti-sol-végétation**

Cette étape consiste à détecter et classer les objets de la scène selon les trois classes. Elle permet d'identifier et de localiser les différents objets. C'est l'étape primordiale avant toute modélisation. La détection et l'identification des objets bâtis, des végétations sont effectuées dans cette étude par une approche hiérarchique basée sur la répartition du sol et du sursol puis du bâti et de la végétation au sein du sursol.

Un objet du sursol est défini comme toute région formée par un ensemble de points altimétriques et dont l'altitude moyenne est supérieure à un seuil fixé à l'altitude du sol dans son voisinage. La classe bâtie est définie comme toute région de la classe du sursol composée d'un ensemble de surfaces planes. Les autres régions du sursol forment la classe végétation.

En s'appuyant sur une méthode d'élaboration d'un système cadastre 3D basé sur le système de copropriété, il est nécessaire de fiabiliser au maximum la détection et la localisation des bâtiments. Les autres détails entrent en jeu dans d'autres systèmes de technique cadastrale tels que le cadastre RPDFF.

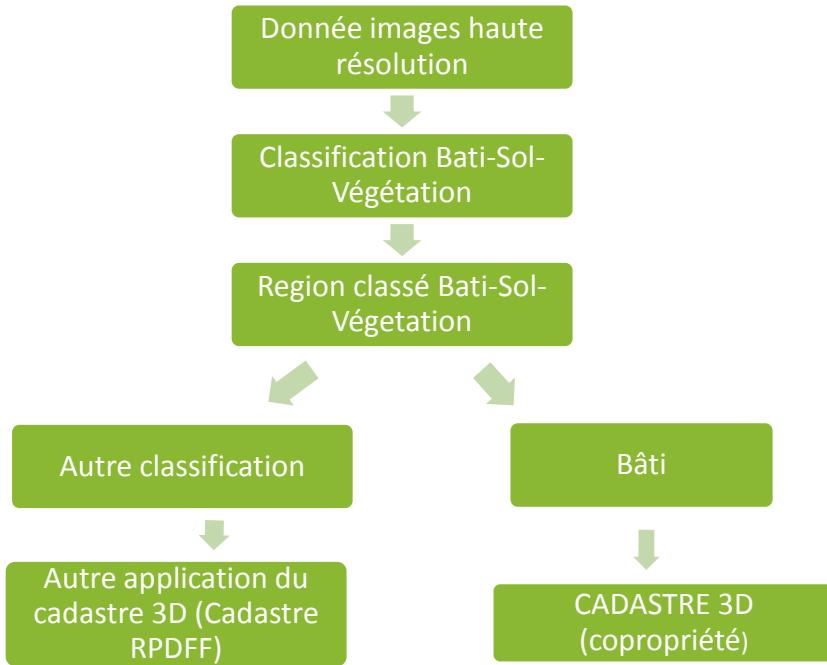


Figure 13 : Etapes pour aboutir à un système cadastre 3D

#### b) Vectorisation du bâti

La détection des limites des bâtiments donne la forme de base des bâtiments. Il est donc nécessaire de mieux distinguer ou vectoriser ces limites pour être utilisées avec précision dans le système cadastre 3D. Elles interviennent surtout dans le système de copropriété ou de la gestion des constructions en zone urbain. A l'issue de la détection des limites en 3D, on peut disposer de zones correspondantes au bâti. Ainsi, on peut localiser les bâtiments dans l'image et on connaît précisément leur forme. La modélisation du bâti se fait alors par des différentes approches. Pour un certain nombre d'applications, seules les limites extérieures du toit sont utiles. La modélisation de toute la région n'est pas nécessaire.

La qualité de la précision de vectorisation des bâtiments est exigée pour l'application du cadastre 3D. Les coordonnées planimétriques et altimétriques doivent être fidèles pour chaque bâtiment. Elles doivent être environ de 20 cm en planimétrie et 15 cm en altimétrie.

## IV Restitution photogrammétrique

### 1) Définition

La restitution photogrammétrique combine systématiquement deux images qui ont été photographiées depuis différents points. Chaque œil observe une autre image et si les images sont bien orientées dans l'appareil, on obtient une vue en trois dimensions. Ainsi, cela facilite l'identification et l'interprétation des détails sur terrain. Pour le levé proprement dit, on utilise une marque flottante qu'on met en contact avec le point à mesurer. L'appareil transforme les coordonnées x, y du point apparaissant sur la photo de gauche et sur celle de droite en coordonnées x, y, z du point qui serait mesuré en trois dimensions sur le terrain. Finalement, ces coordonnées x, y, z sont enregistrées et traitées à l'aide de logiciels graphiques. Actuellement, on utilise des matériels sophistiqués qui permettent de réaliser facilement et plus rapidement la restitution [Cord 1998].

À SARYTANY, il existe un atelier de restitution photogrammétrique. Cet atelier traite des données de prise de vue aérienne issues de la photogrammétrie numérique. La plupart du temps, on réalise des plans topographiques mais les travaux sont désignés suivant les besoins des clients. Durant mon stage, on a pu effectuer une étude basée sur la restitution des bâtiments en milieu urbain.

### 2) Matériels de restitution

La restitution des bâtiments est réalisée à l'aide des matériels photogrammétriques. Ces matériels sont composés d'un écran stéréographique, un Keyport, une Lunette 3D, un « Stealth mouse », un écran de visualisation.

- L'écran stéréographique est un écran qui, avec la lunette 3D, permet une visualisation en 3D des couples photo. SARYTANY utilise un écran de marque LEICA spécialement conçu pour un traitement photogrammétrique.

- Le Keyport est un clavier de raccourci bibliothèque qui permet de faire des saisies de détails. Par exemple, il existe un bouton de raccourci pour la saisie des talus, des arbres, ou d'autres détails utiles en topographie

- Le « Stealth Mouse » est comme une sorte de combinaison entre une souris et une manette. Il est constitué de plusieurs boutons (10) programmables, avec un système « scroll » pour effectuer un zoom. On peut effectuer des déplacements avec une grande précision à partir de ce « Stealth Mouse ». Ainsi, la vectorisation du bâtiment se fait à partir de ce matériel.

- Un autre écran en réseau avec l'écran stéréographique permet de départager la visualisation. On ne peut pas voir une image 3D à partir de cet écran.



Figure 14: Présentation des matériels photogrammétriques. 1) Stealth 3D, 2) Lunette 3D, 3) Écran stéréographique

### *3) Méthode de Restitution*

La restitution se fait manuellement sur le logiciel Leica Geosystème Suite. Après divers traitements photogrammétriques, on peut maintenant visualiser les couples photo sur l'écran.

La stéréorestitution est le processus permettant l'obtention d'un plan topographique fiable à partir des photographies aériennes. Les objets et leur environnement, dès lors qu'ils sont clairement identifiables sur les images, sont directement reproduits sous forme de données vectorielles tridimensionnelles ou de point 3D. L'opérateur dispose d'une station numérique avec un écran haute résolution, capable d'afficher les images en trois dimensions à l'aide de lunette 3D. Pour dessiner un objet, le photogrammétre doit positionner le pointeur de la souris 3D (TopoMouse) à son altitude apparente. Le déplacement planimétrique est un déplacement de droite à gauche de la souris 3D. Le déplacement altimétrique est effectué par un système de zoom sur l'objet à numériser. Si l'image est nette, on est sur l'altitude vraie du bâtiment puis on numérise par une des touches programmées sur la souris 3D le contour du bâtiment. Par contre si l'image est floue et devient difficile à regarder, on n'est pas sur l'altitude de l'objet. Une image floue de l'objet signifie donc que les deux couples d'images affichées sur l'écran ne se coïncident pas.

Pour des cas particuliers, il est possible de dessiner tous les objets convenables avec l'échelle du plan désiré comme les aéroports, les autoroutes, les barrages, les barrières et les clôtures, les bassins de rétention, les champs, l'éclairage public, les églises, les étangs et les lacs, les gazoducs-oléoducs, les lignes électriques, les littoraux, les marquages au sol, les mobilier urbains, les ponts, les poteaux, les rivières et les fleuves, les stades, les trottoirs, les végétations, ... Des symboles spécifiques peuvent être utilisées pour les objets ponctuels en utilisant le keyport.

La restitution permet de produire rapidement des plans topographiques pour de grande superficie tout en mesurant davantage des points que lors d'un levé topographique ordinaire. En outre, il s'agit de la solution à mettre en œuvre dans les régions inaccessibles par voie terrestre. Toutefois, l'attention

du lecteur est attirée sur le fait que la qualité du pointé dépend de l'expérience et de la vision de l'opérateur.

### RESUME

Ce chapitre vise en général, la reconstruction des bâtiments par méthode photogrammétrie numérique. On a pu en extraire des configurations recommandées pour l'acquisition des données 3D. A part la méthode photogrammétrique, on peut aussi citer le système LiDAR qui s'avère être une autre décision pour l'acquisition des données. Ainsi, on va parler de ce système dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE II LiDAR

La vitesse d'acquisition des données 3D à très haute résolution spatiale ainsi que leur traitement automatique sont des sujets de recherche d'actualité dans le domaine de la topographie. De plus, jour après jour, le besoin de disposer des techniques rapides fournissant des modèles 3D urbains s'agrandit. Dans ce contexte, le système d'acquisition par balayage laser aéroporté, de technologie récente, permet de répondre à ces nécessités. Encore appelé LiDAR (Light Detection and Ranging), il fournit des nuages de points 3D de densité élevée et de distribution plus ou moins régulière, en un temps relativement court.

### I Généralités sur le Lidar

#### 1) *Définition*

Le Lidar ou Light Detection and Ranging qui veut dire détection de la lumière et mesure à distance, désigne une technique de télédétection « active », avec émission de lumière. Le LiDAR utilise la technique du laser pour la collecte à distance, de données concernant la scène que l'on observe. Il se distingue ainsi des méthodes dites passives basées sur le rayonnement naturel telles que la spectroscopie ou la photographie aérienne. De multiples systèmes Lidar ont jusqu'à présent été développés mais tous consistent en l'association de trois instruments : un système à impulsion laser, un récepteur ou détecteur optique et un système d'acquisition [Wiki 2013].

#### 2) *Principe général*

Le principe de fonctionnement est que l'appareil laser génère, à intervalles réguliers, une série d'impulsions lumineuses intenses avec plusieurs mégawatts. Celles-ci sont modulées à une fréquence choisie en fonction de l'information recherchée. Ces impulsions sont émises en direction de l'objet d'étude, lequel peut être une surface solide, liquide ou gazeuse (sol nu, sol recouvert de végétation, glace, couche atmosphérique, mer...). La cible est en réalité tout objet susceptible de réfléchir le signal.

En interagissant avec la surface, le signal se scinde en plusieurs composantes : l'une est diffusée ou absorbée par le milieu, l'autre est réfléchie et en partie renvoyée en direction de la source du rayonnement laser. L'interaction avec le milieu modifie certains de ses paramètres physiques tels que la fréquence, l'intensité, la phase. De plus, l'écart en temps entre l'instant d'émission et l'instant de réception du signal est représentatif de la distance parcourue par ce dernier, donc de la distance séparant la source de rayonnement de la scène qu'on utilise pour reconstituer le relief. L'intensité quant à elle est une luminance, couramment utilisée à l'état passif en télédétection.

De façon plus brève, en connaissant la vitesse de diffusion du laser et le temps entre l'émission et le retour, il est possible de calculer la distance qui sépare le capteur du sol ou des objets opaques qui le recouvrent.

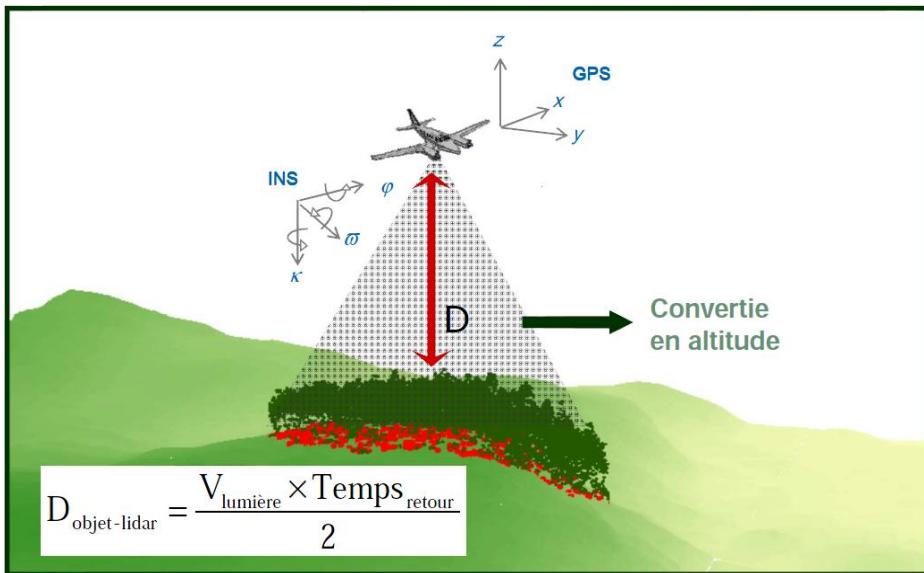


Figure 15 : Principe général du LiDAR

### 3) Principe géométrique

En pratique, on détermine d'abord la trajectoire de la plateforme (trajectographie) en latitude, longitude, altitude, roulis, tangage, lacet. Ensuite, cette trajectoire est transformée dans le système de coordonnées usuelles et interpolée pour chaque impulsion laser. La distance (*range*) et l'angle de scannage (*scan angle*) sont calculés pour chaque écho reçu. A l'aide de ces informations, on calcule un point lancé pour chaque écho, auquel on ajoute la valeur d'intensité et le numéro de retour. En répétant cette opération plusieurs fois par seconde, on génère le nuage de points. Chaque impulsion peut produire un, deux ou plus échos, d'où un nuage encore plus dense. Pour rappel, le GPS associé fonctionne à 2 ou 5 Hz et l'IMU à 200 ou 400 Hz. Le laser est donc considérablement plus dense que ces deux informations.

Les trois paramètres roulis, tangage, lacet, appelés « angles d'Euler » sont trois angles définis autour des axes du système lié à la plateforme :

- $\psi$  l'angle de roulis mesure la rotation de la plate-forme autour de l'axe de fuselage (x) ;
- $\alpha$  l'angle de tangage mesure la rotation autour de l'axe perpendiculaire au précédent dans le plan horizontal (axe des ailes dans le cas d'un avion (y)) ;
- $\beta$  l'angle de lacet ou l'azimut mesure la rotation autour d'un troisième axe de telle façon qu'ils forment un trièdre orthonormé direct (z).

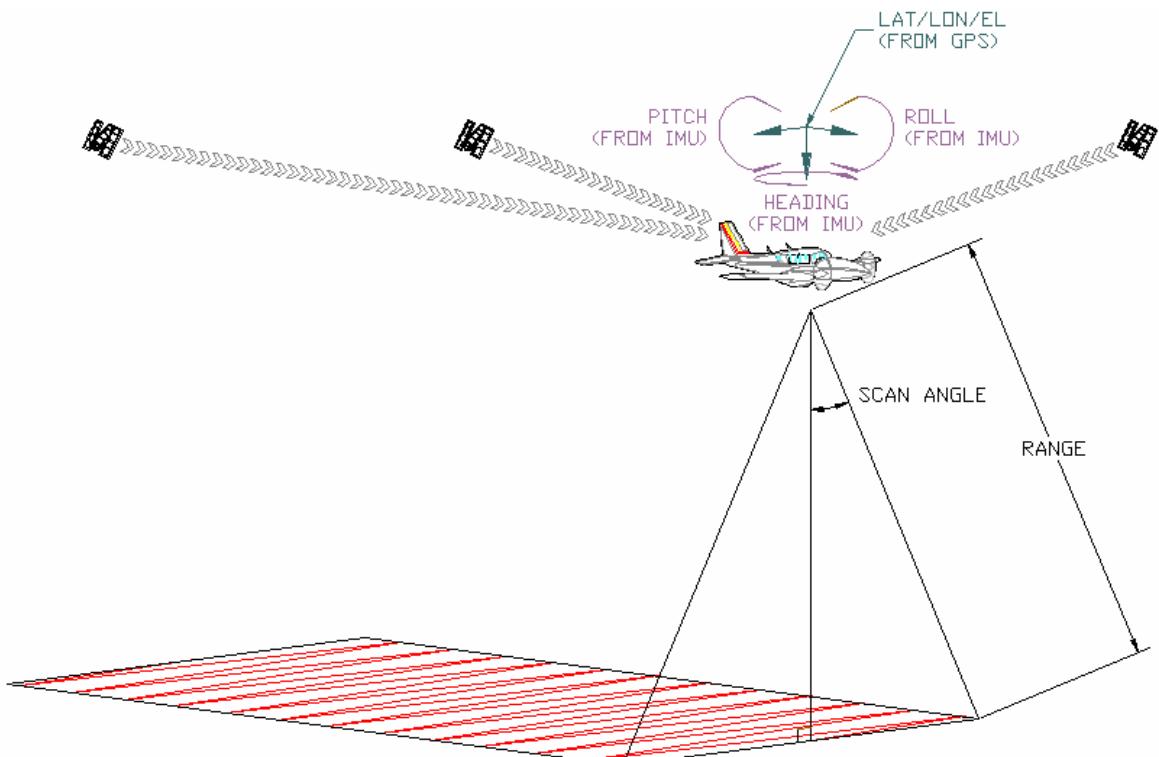


Figure 16 : Géométrie du LiDAR

#### 4) Principe d'écho multiple

Le phénomène des échos multiples est une propriété très intéressante du LiDAR. Durant le vol, la surface couverte par une impulsion, que l'on appelle empreinte au sol, correspond à un cercle de 20 à 30 cm de diamètre en moyenne. L'impulsion peut donc être réfléchie par plusieurs surfaces situées à l'intérieur de ce cercle, et elle engendre alors plusieurs échos. Ceci se produit principalement au niveau de la végétation et des bords de bâtiments. Par exemple, lors de l'acquisition de données LiDAR au-dessus d'une forêt, une partie de l'impulsion est réfléchie par la végétation, tandis que le reste la traverse avant d'être réfléchie par le sol.

Chaque surface rencontrée par l'onde correspond à un écho, ce qui permet de distinguer des structures situées sous couvert végétal. Ce phénomène se produit si les surfaces rencontrées sont assez éloignées l'une de l'autre, sinon il y a recouvrement entre les deux échos et on ne peut plus les distinguer.

En terrain nu (sans sursol), à une impulsion émise correspond le plus souvent exactement un écho reçu. Le taux de retour est proche de 100%.

Dans les zones de végétation, le taux de retour est plus variable. Il est de l'ordre de 60% - 90% et certains nombres d'impulsions ne remontant jamais jusqu'au récepteur. Le signal traverse le feuillage lors des trajets aller et retour. Une autre condition est que le signal retour soit suffisamment fort pour être détecté par la surface du sol.

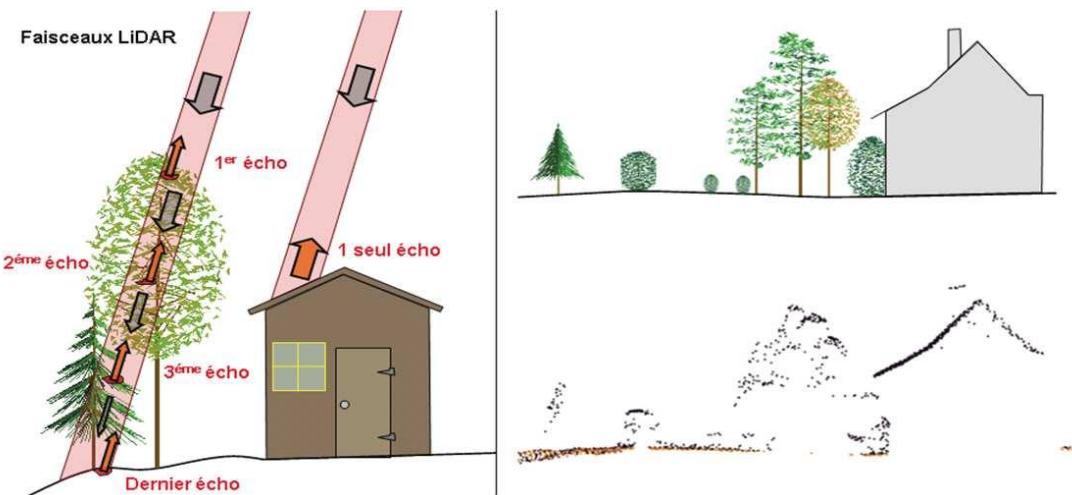


Figure 17 : Principe d'écho multiple et représentation des nuages des points

Le premier retour est issu de la réflexion avec le premier objet rencontré. Le deuxième écho est un retour intermédiaire provenant des réflexions volumétriques à l'intérieur des objets transpercés par le faisceau laser. Le dernier écho revient au capteur après avoir été réfléchi par le dernier objet qui est souvent la surface du sol.

## II Outils et Matériels

### 1) Matériels utilisés

Pour acquérir des données altimétriques exploitables, à savoir les coordonnées (X, Y, Z) des points du sol atteints par le faisceau laser, il est nécessaire de connaître la position par rapport au paysage de la plate-forme qui porte le scanner laser. Pour cela, on intègre à l'appareillage plusieurs capteurs de haute technologie supplémentaire. Ce sont le scanner Laser, le GPS, la centrale de navigation interne INS, les caméras de haute résolution ainsi que l'outil de navigation aérienne.

#### a) Scanner Laser

Le scanner Laser est un système à balayage constitué de deux éléments, une source laser et un miroir qui assurent la mesure de la distance qui sépare l'avion de la surface. La source laser émet, à intervalles réguliers un rayonnement de haute fréquence de 100- 80000 Hz d'une durée de 1 à 10 nanosecondes. En général, la longueur d'onde de la lumière incidente est choisie pour ne pas pénétrer le matériau de surface, en particulier l'eau et se situe pour cela dans l'infrarouge, avec comme valeurs typiques 1.047 µm, 1.064 µm et 1.54 µm. L'intensité élevée du signal de l'ordre du mégawatt lui garantit un trajet sur une longue distance et permet de travailler en réflexion. Le miroir se charge d'orienter l'impulsion en direction de la surface.

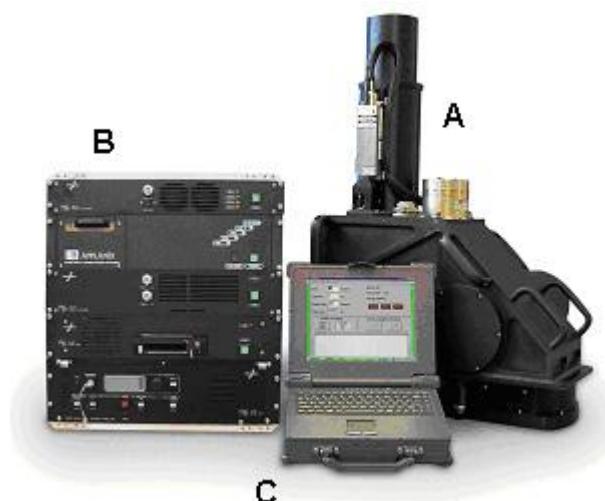


Figure 18 : Type de scanner Laser (ALS 40)

A : Le scanner laser qui est principalement constitué d'un émetteur laser à impulsion, d'un système de miroirs dont l'un est oscillant, d'un système de réception à diode et d'une centrale inertuelle APPLANIX.

B : Le rack informatique qui comporte un système de positionnement (récepteur GPS et centrale inertuelle APPLANIX) avec le lecteur de carte PCMCIA pour le stockage des données, le périphérique de stockage des données laser (disque dur extractible) et l'alimentation de l'ensemble.

C : Un PC portable qui contrôle le tout. C'est le test de fonctionnement et la commande du système

### b) GPS et INS

#### b.1 GPS

Le système de positionnement GPS ou Global Positioning System est un système de navigation basé sur les satellites, développé et opéré par le département de la défense des USA. Il permet aux utilisateurs de déterminer leur position tridimensionnelle, leur vitesse et le temps partout dans le monde.

Durant le vol, il détermine très précisément la position de l'avion à une fréquence de 1 Hz et par conséquent celle de l'altimètre laser au cours de la télémétrie. Ceci est nécessaire pour localiser dans l'espace les points atteints par le laser et recueillir ainsi, des données altimétriques géoréférencées. Un récepteur GPS mono ou bi-fréquence pouvant travailler en mode différentiel avec une station GPS fixée au sol et géoréférencée est pour cela intégré à la plate-forme. La trajectoire de l'avion est finalement déterminée avec une marge d'erreur avoisinant de 3 cm.

### b.2 INS

La centrale de navigation interne INS ou Inertial Navigation System est composée d'inclinomètre et d'accéléromètre qui sont utilisés pour déterminer les accélérations et les changements d'attitude du laser scanner occasionnés par les mouvements de l'avion au cours du vol (roulis, lacet, tangage). La direction de visée est ainsi connue. L'INS procure des informations fiables de hautes précisions en trois dimensions à court terme lorsque le GPS ne le permet pas ou est indisponible (nombre de satellites en visibilité insuffisant, interférences électromagnétiques, environnement présentant des risques de multi-trajets, obstruction du signal des satellites, ...)

### b. 3 Combinaison GPS/INS

Le GPS fournit une position absolue à une fréquence basse. L'IMU fournit une position relative et orientation absolue à une fréquence élevée. Le GPS offre une aide à la navigation inertuelle. Les deux combinées fournissent donc une fréquence élevée de position, de vitesse ; d'accélération, du roulis et tangage, du lacet ainsi que de la vitesse angulaire.

Le GPS fournit une position absolue à une fréquence basse (par exemple 2 Hz). L'IMU fournit une position.

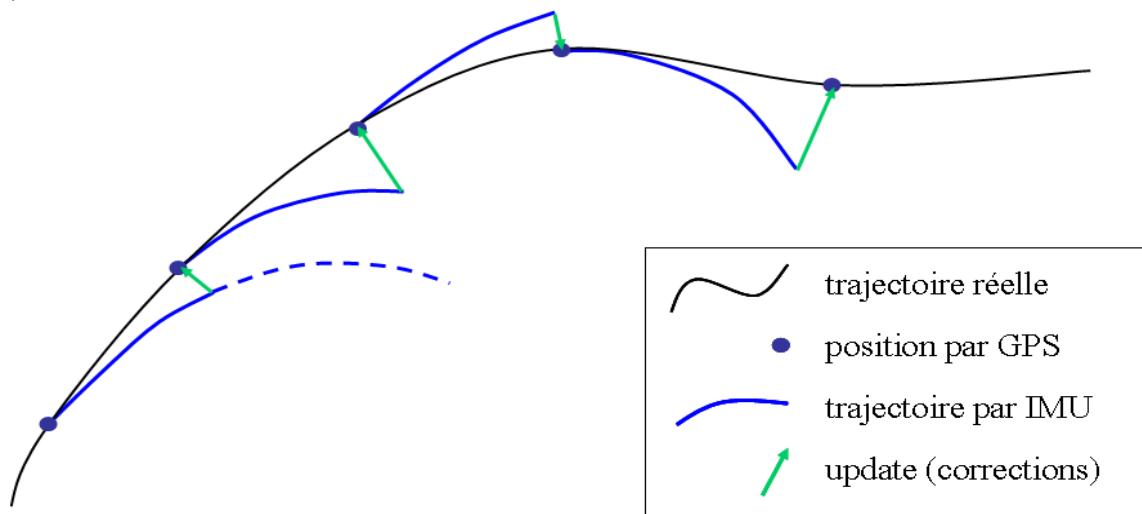


Figure 19 : Principe de la correction de l'IMU par le GPS

Voici un tableau montrant la précision obtenue pour des types navigation (en temps réel) et post-traitée.

TYPE	POSITION	VITESSE	ROULIS ET TANGAGE	LACET
NAVIGATION	$d = 3\text{-}10 \text{ m}$	$v = 0.5 \text{ m/s}$	$\sigma = 1'$	$\sigma = 5'\text{-}10'$
POST-TRAITEE	$d = 10\text{-}30 \text{ cm}$	$v = 0.05 \text{ m/s}$	$\sigma = 20''$	$\sigma = 30''$

Tableau 3 : précision par combinaison GPS/INS

### c) Caméra de haute résolution

Le Laser scanner peut être équipé d'une caméra numérique de haute résolution par un bras de support calibré au niveau du scanner. L'appareil est utilisé pour collecter une imagerie qui sert à obtenir l'information radiométrique du modèle 3D et parvenir à un modèle 3D suivant les couleurs de l'objet.



Figure 20 : Caméra numérique Ultracam X-Prime

### d) Type de plateformes

L'avion reste majoritairement la plateforme aéroportée la plus choisie pour les travaux de mesures aériennes. C'est le seul qui, avec l'hélicoptère, offre la possibilité de se rendre sur un chantier éloigné de plusieurs centaines de kilomètres pour y effectuer la campagne de mesure, et rentrer à l'aérodrome dans la même journée.

Le capteur est dans la majorité des cas placé au-dessus d'une trappe dans la carlingue inférieure, qui par ailleurs, doit légalement donner suite à une déclaration de modification de l'aéronef. D'autres instruments sont conçus pour effectuer les mesures par la porte latérale de l'aéronef. De plus en plus, les équipementiers d'aéronefs aménagent deux trappes dans la carlingue, permettant l'acquisition simultanée d'une même zone avec deux instruments différents [Lesorbe 1999].



Figure 21 : Type de plateforme à deux trappes

## 2) Plan de vol

Le plan de vol d'un levé LiDAR est une étape importante et minutieuse dont dépend fortement la qualité finale des données. La zone d'étude doit faire l'objet d'un recouvrement optimal entre chaque bande levée. Elle est composée de plusieurs lignes de vol dont la direction est judicieusement choisie selon la zone d'étude et la topographie de la zone. Programmer un plan de vol pour une campagne LiDAR sur un sol nu revient principalement à choisir des axes de sorte qu'aucune partie du terrain ne soit négligée. Il faudra s'assurer qu'un recouvrement transversal minimum ait été considéré ; ou que la hauteur de vol permette de respecter les précisions attendues en X, Y et Z; ainsi que la fréquence de scannage coïncide avec la hauteur de vol. En effet, il faut que le récepteur du système ait capté le signal retour de l'impulsion précédente avant d'en émettre une nouvelle. Or, la durée entre l'émission et la réception varie en fonction de la hauteur de vol [Gervaix 2010].

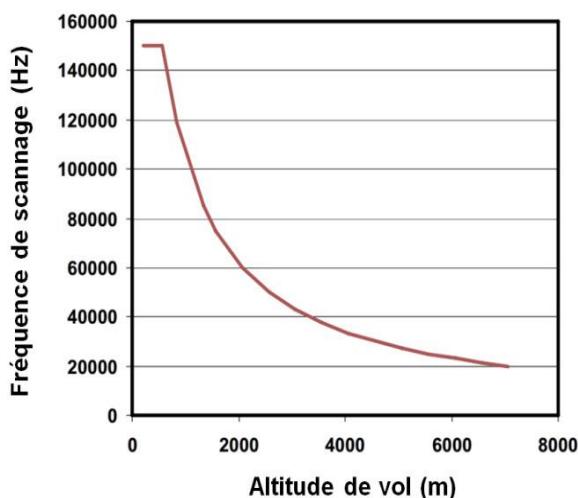


Figure 22 : relation entre la fréquence de scannage et l'Altitude de vol

L'une des spécialités du LiDAR est que la prise de vue peut être effectuée durant la nuit. Le choix du projet dépend de la saison. Par exemple pour une bonne qualité de MNT, la saison hivernale est la mieux grâce à l'absence des feuillages. Par contre, l'été permet d'obtenir des Modèles Numériques de Canopée (MNC) denses.

## III Contrôle de précision LiDAR

La vitesse d'acquisition des données 3D à très haute résolution et le traitement automatique de ces données sont des sujets de recherche d'actualité dans le domaine de la topographie. Dans ce contexte, le système d'acquisition par balayage laser aéroporté trouve toute sa place. Il fournit des nuages de points 3D de densité élevée et de distribution plus ou moins régulière. Ainsi, on va détailler la nature des précisions sur chaque système que compose le LiDAR.

### 1) *Détection des échos*

La capacité de détection de diverses formes du terrain avec une bonne précision est l'une des avantages du LiDAR. Le principe de l'écho vu au paragraphe précédent justifie cette hypothèse.

La qualité de l'altimétrie des échos dépend de la capacité du système à détecter, des pics d'intensités correspondant à l'onde réfléchie. Lors de l'utilisation du mode multi-échos, deux cibles heurtées par le même faisceau ne seront discernables sous la forme de deux échos nettement séparés que si elles sont éloignées typiquement d'une distance supérieure à 0,5 m. Dans le cas contraire, le point de mesure sera quelque part dans la couche de sursol bas. Notons que tout l'apport d'une description sous forme d'onde complète fournit une résolution le long du faisceau de 15 cm [Bretar 2006].

### 2) *Densité des points*

La densité des points est une donnée relativement peu ajustable car les appareils ont des fréquences fixes. Dans ce cas, à une altitude donnée correspond une certaine densité. Elle dépend de l'avion capteur par sa vitesse, sa stabilité et sa facilité de déplacement. Dans une végétation trop dense, le dernier écho détecté ne correspond pas toujours au sol mais au point le plus éloigné du senseur atteint par l'impulsion lumineuse. La différence entre le premier et le dernier écho n'est donc pas toujours représentative de la hauteur exacte de la couverture végétale. La densité des points est alors fonction du projet LiDAR. Le tableau ci-dessous fera l'exemple [Berru 2012] :

Projets	Densité (points par m <sup>2</sup> )	Précision altimétrique (cm)
Etudes hydrauliques	1 à 4	15 à 30
Archéologie	15 à 25	15
Etudes réseaux	1 à 4	15 à 30
Zone Urbaine	15 à 25	15

Tableau 4 : distinction des densités des points en fonction des projets

Notons que la densité de points par mètre carré n'augmente en aucun cas la précision altimétrique du levé LiDAR. L'avantage d'une bonne densité de points se voit dans les qualités des détails.

### 3) *Système de référencement*

Les cadences d'acquisitions des données GPS et INS sont différentes pour des fortes proportions de l'INS [Gervaix 2010]. Les données trajectographiques sont donc acquises à la fréquence de l'inertie. Cette fréquence est bien inférieure à la cadence d'émission et de réception des points lasers, ce qui pose le problème du sur-échantillonnage de la trajectographie, et donc des artifices provoqués par les

interpolations. En somme, une grande majorité des points lasers seront référencés en se basant sur une trajectographie interpolée et non sur des mesures effectives. Notons que les mesures GPS atteignent une précision de 5 à 30 cm si la station fixe utilisée pour le mode différentiel est à une distance inférieure à 50 km du chantier. Les imprécisions des points laser proviennent généralement des erreurs dans le processus de référencement, donc dans la mesure de l'attitude de l'avion.

#### IV Spécification pour le système cadastre 3D

Le système cadastre 3D se réalise en milieu urbain. On va donc se focaliser sur la spécification du système LiDAR en milieu urbain. On a déjà vu dans le contrôle de précision que le système LiDAR peut s'adapter pour l'acquisition des données urbaines. Il existe alors des spécifications dont on doit tenir compte pour avoir des données fidèles et précises.

##### 1) Mode Multi-écho

Les premiers Lidar apparus dans le commerce n'enregistraient le temps de retour que d'un seul écho rétrodiffusé. Cependant, même pour de petites tâches au sol entre 0,2 et 2 m, il est très fréquent d'atteindre plusieurs objets. Du fait de la séparabilité du faisceau laser, plusieurs rétrodiffusions propres à chaque objet rencontré sont alors générées. Aujourd'hui la totalité des systèmes actuels dits multi-échos mesurent la première et la dernière impulsion alors que certains peuvent enregistrer jusqu'à six échos pour une unique impulsion. Les deux premiers échos concentrent environ 90 % de l'énergie totale réfléchie. Cela est montré sur la figure suivante avec une comparaison entre l'altitude des premier et dernier échos laser sur une zone urbaine.

Pendant le levé, il arrive que le faisceau laser rencontre plusieurs éléments avant d'arriver au sol. Il peut être réfléchi par des lignes de haute tension, un arbre ou par le sol lui-même. Une différence importante entre le premier et le dernier écho permet de catégoriser l'objet étudié. En effet, théoriquement, les points qui représentent les arbres présentent une différence d'altitude considérable entre le premier et le dernier écho mesuré. On observe les mêmes caractéristiques en bordure de bâtiment, ou lorsque les bâtiments sont proches ou attenants. Par contre, lorsque le faisceau touche sur toute sa surface un bâtiment, l'écart entre le premier et le dernier écho sera négligeable ou au-dessous d'un certain seuil. L'utilisation de la différence entre le premier et le dernier écho est très courante pour éliminer la végétation de la classe sursol, à condition que le dernier écho soit fiable.

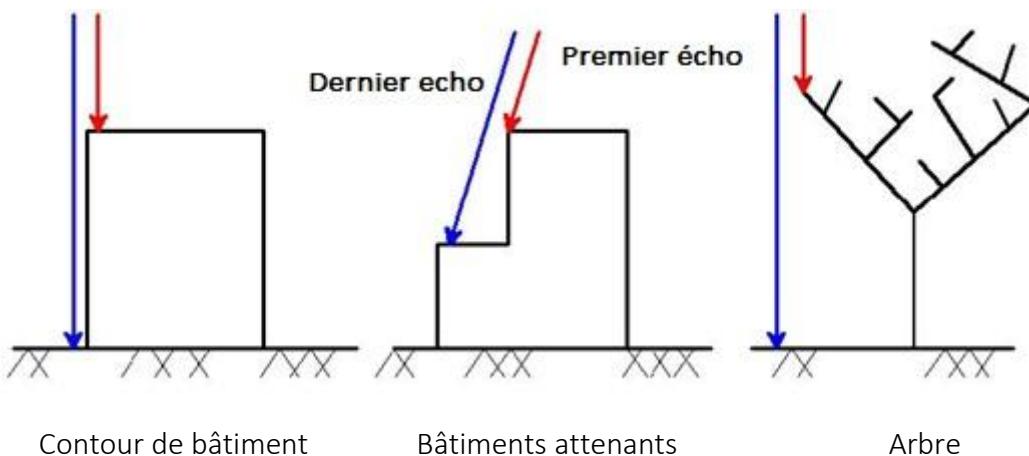


Figure 23 : Comparaison entre l'altitude des premier et dernier échos laser en zone urbaine  
 (Premier écho en rouge, dernier écho en bleu)

Dans des applications en cadastre 3D, le mode multi écho serait un atout. Pour le milieu urbain, ce mode multi-écho est le plus conseillé pour sa capacité et sa précision.

## 2) Paramètre de vol

### a) Type de plateforme

Pour avoir une bonne qualité de données, un hélicoptère est le plus recommandé par les spécialistes pour sa maniabilité. L'un des exemples le plus fréquent est sa rapidité dans les virages qui se fait en quelques secondes par rapport à l'avion.

Il permet aussi d'effectuer des vols lents et à basse altitude pour avoir une bonne densification des points au sol. Notons que l'environnement urbain demande un maximum de densité de points. Elle peut être environ entre 15 à 25 points/m<sup>2</sup>.

Voici un tableau comparatif entre 2 types d'aéronef où l'on peut voir l'avantage de l'hélicoptère [Lesorbe 1999].

	Hélicoptère	Avion
Densité (pt/m <sup>2</sup> )	1 - 200	0.1 - 10
Précision (m)	0.03 – 0.15	0.1 – 0.5
Visée	Nadir, Oblique	Nadir
Surface (km <sup>2</sup> )	0.01 - 30	> 20

Tableau 5 : Critère de choix pour l'aéronef, en fonction de la densité, de la précision et du terrain

### b) Hauteur de vol

Divers expériences de vol permettent de voir qu'il y a une relation entre la hauteur de vol et l'écho émis par le LiDAR. Plus précisément, il existe une relation entre la disponibilité ou la validité du dernier écho et la hauteur de vol. Elle stipule que si la hauteur de vol est supérieure à 900 m, le dernier écho n'est pas valable. De plus, il est important ici de noter que la précision du dernier écho est moins grande que celle du premier écho. On peut en tirer qu'une hauteur de vol  $\leq 900$  m devra être envisagée pour l'acquisition des données.

### 3) Système de référencement

Pour le système de référencement, l'emploi du système Hybride GPS/IMU est recommandé. Il permet de mieux ajuster les coordonnées des points. Si les récepteurs GPS sont équivalents en termes de précision de positionnement, le type d'IMU, va influencer directement la précision du géoréférencement des points au sol. On a déjà évoqué leur précision dans les paragraphes précédents [Gervaix 2010].

## RESUME

La technologie du LiDAR aéroporté utilisant le mode multi-échos est un moyen plus rapide au niveau des traitements que celui de la photogrammétrie classique pour une acquisition des informations tridimensionnelles fiables. Par contre, la question de la qualité géométrique des données LiDAR est encore mise en question si elles sont confrontées à une géométrie photogrammétrique.

---

## PARTIE III : CONCEPTION DU PROJET

---

*Cette dernière partie concernera les travaux personnels effectués au sein du stage pour faire ressortir le système de cadastre 3D envisagé. On évoquera en premier lieu la réalisation du prototype cadastre 3D sur le cas de copropriété à Madagascar par méthode photogrammétrique. En second lieu, un travail sur une notion de perspective LiDAR pour son apport en 3D.*

## CHAPITRE I PRESENTATION DES DONNEES

Quand on parle d'une numérisation 3D, on ne peut pas se défaire de l'ordinateur. La vision par ordinateur est un domaine qui s'est développé dès qu'on a su numériser des images, et elle couvre de nombreuses applications orientées vers le temps réel, ceci incluant l'extraction automatique d'éléments dans l'image. D'abord les contours des images puis des éléments de plus en plus évolués jusqu'à des objets complexes. Ensuite, la volumétrie des objets visibles à partir des images prises de deux points de vue différents, en permettant un effet stéréoscopique. De ce fait, les photogrammétries intégrées dans l'ordinateur partagent les mêmes recherches de mesure 3D à partir de deux couples d'image.

### I Traitement des données brutes

#### 1) Etape de traitement

Le traitement photogrammétrique par ordinateur se caractérise par différentes étapes de l'orientation images en 3D. La première étape est celle du calcul des paramètres internes ou l'orientation interne. De manière générale, on procède au calcul de la matrice de calibration. La deuxième est le calcul des paramètres d'orientation et de localisation d'une image par rapport à une autre. Cette étape est appelée orientation relative. Par ordinateur, on procède au calcul des matrices essentielles. Après cette étape, les images sont mises en place dans l'espace dans un référentiel par défaut et sans échelle. Il est indispensable de mettre ces images dans une référence connue. Cette dernière étape est l'orientation absolue [Kalantri 2009].

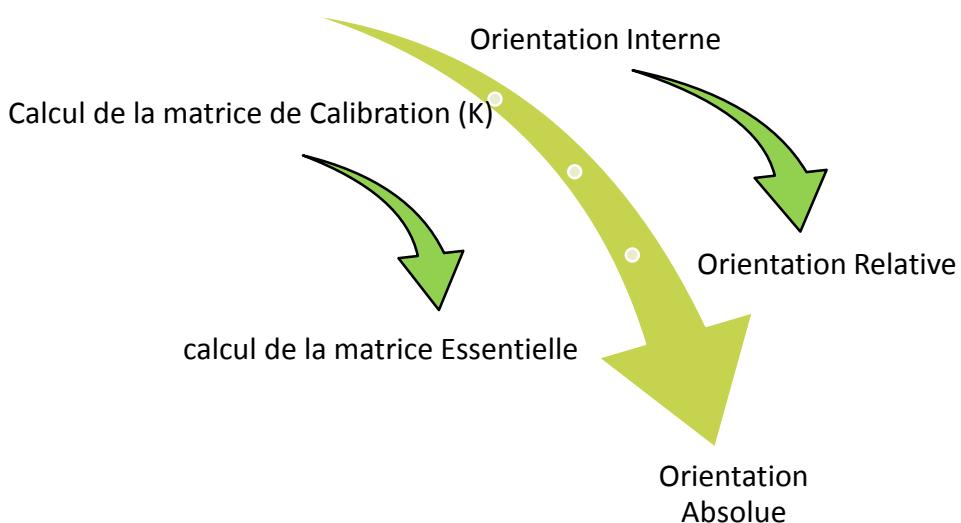


Figure 24 : Etapes de traitement par ordinateur

## 2) *Logiciel de traitement*

Il existe beaucoup de logiciels de photogrammétrie qui couvrent toutes les tâches de l'importation de données brutes à la production des produits obtenus par un levé photogrammétrique. Le principe est très similaire dans tous les logiciels mais comme souvent, on se lie à un logiciel par maniabilité, par affinité ou par confort. Ces logiciels ont des caractéristiques importantes comme :

- Un rendu graphique rapide ;
- Un zoom continu dans les images ;
- Positionnement du curseur à l'intérieur d'un pixel ;
- Chargement « intelligent » des images ;
- Conversion instantanée du système de coordonnées ;
- Auto-corrélation rapide et fiable ;
- Auto-corrélation basée sur la structure ( $\neq$  texture) ;
- Contrôles de qualité intégrée ;
- Données créées en formats compatibles SIG ;
- Photogrammétrie et télédétection intégrées.

SARY TANY utilise comme logiciel de traitement photogrammetrique le logiciel Leica Geosystème LPS. Le Leica Photogrammetry Suite est un module de la suite ERDAS Imagine. LPS core est le nouveau module standard de photogrammétrie. Avec ce module, il est possible de réaliser sur des chantiers complets, l'ensemble de la chaîne de traitements pour passer des images brutes à des images géométriquement précises. On parle ici des orientations en photogrammétrie, l'aérotriangulation, la prise des points d'appui et liaison. Ce logiciel incorpore en entrée un grand nombre de modèles de capteurs dont les caméras métriques, les satellites SPOT, Quickbird ou d'autres.

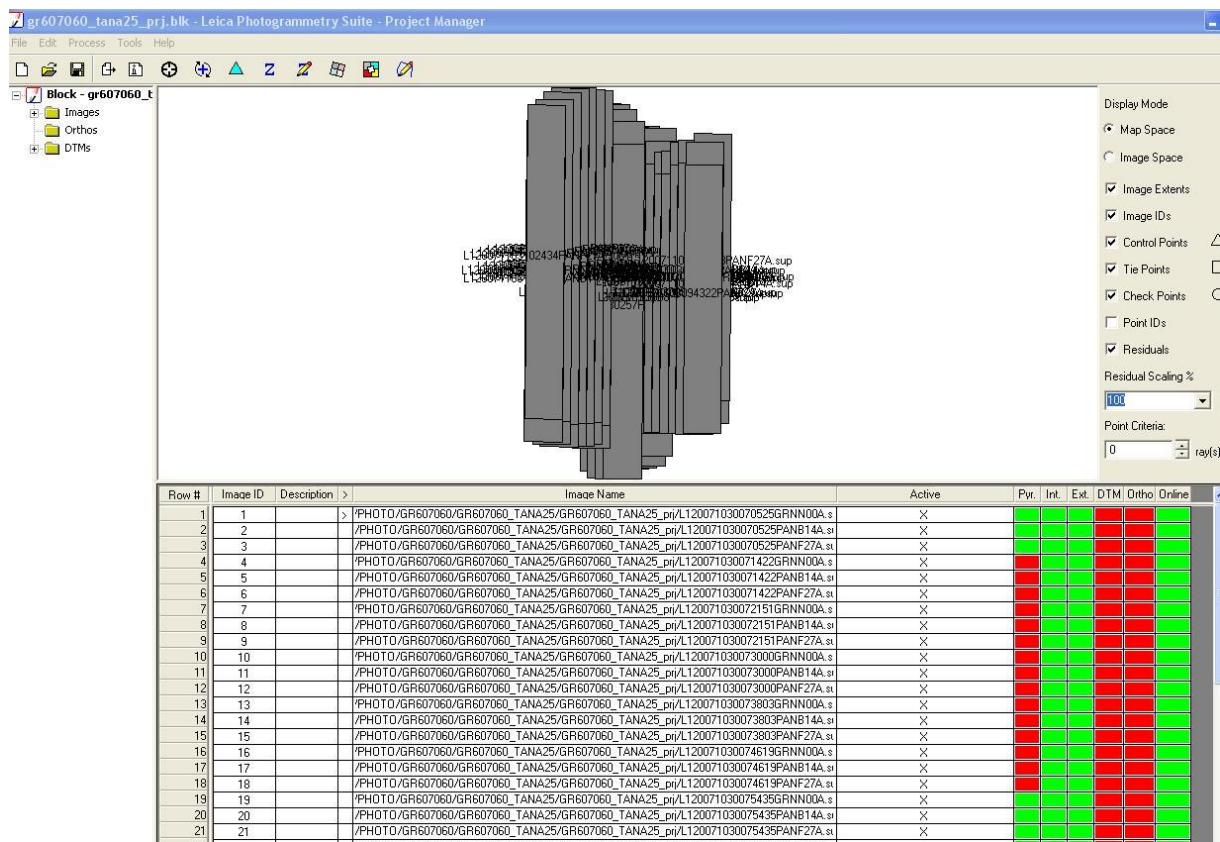


Figure 25 : bloc de photo sur de Tanà-Ville

### 3) Format des images

Il existe trois formats d'image qui sont les plus répandus dans le domaine de la photogrammétrie aérienne. On va résumer ces formats dans un tableau avec leur description et leur nom.

Nom	Format	Description
"Image brute"	.raw	L'image brute, comme son nom l'indique, n'a subi aucun traitement et aucune compression. C'est un fichier non altéré et non dégradé. Il est parfois comparé aux négatifs des clichés argentiques, dans le sens où comme eux, il est le véritable reflet de l'image enregistrée par le capteur au moment de l'acquisition.
Tagged Image File Format	.tif	Nécessite une capacité de stockage conséquente mais préserve la qualité radiométrique et géométrique du cliché numérique.
Joint Photographic Expert Group	.jpeg	C'est le parfait compromis entre poids des fichiers et qualité de l'image. En photogrammétrie, on n'admet généralement que le .jpeg n'admet pas de perte significative de la qualité (50% à 75%) pour un taux de compression de 15:1

Tableau 6 : description des trois formats d'image

## II Analyse des données

Dans cette partie, les données utilisées sont des données existantes à Madagascar. Ainsi, la modélisation sera un extrait de ce que le Cadastre 3D représente pour Madagascar.

Ces données sont constituées du MNT d'Antananarivo, la restitution photogrammétrique Tana-Ville faite au sein du SARYTANY ainsi que les plans numériques au sein du PNF Madagascar. Tout ceci nous permet d'avoir un prototype de ce qu'un Cadastre 3D représente.

### 1) Données de la Restitution photogrammétrique

L'entreprise SINTEGRA a effectué une prise de vue aérienne sur une zone d'Antananarivo. Les photos prises sont restituées, vectorisées et exportées sous format Autocad. Ainsi, SARY TANY dispose des données de restitution photogrammétrique qui sont nécessaires pour la réalisation de notre prototype. La restitution a duré plusieurs mois puisqu'on vectorise un par

un chaque détail. Les données restituées sont sous format .dwg.



Figure 26 : Restitution sur Anosy dans Autocad

Ces données restituées sont connues en coordonnées planimétriques et altimétriques par suite de la restitution photogrammétrique.

## 2) MNT de l'agglomération d'Antananarivo

Suite à la prise de vue aérienne, SARYTANY dispose d'un Modèle Numérique de Terrain MNT sur Tana Ville. Ce Modèle Numérique du Terrain est calé avec l'orthophoto existant, ce qui nous permet d'avoir un Modèle Photographique Topographique .mpt utilisé dans Terra Explorer

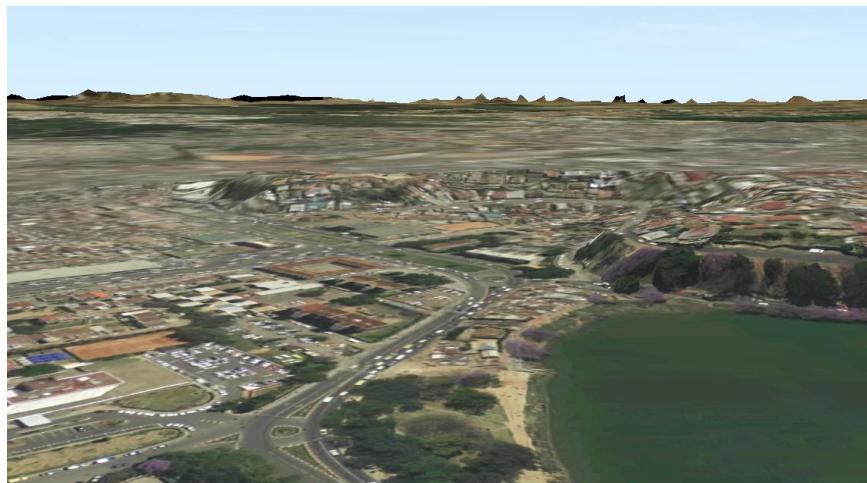


Figure 27 : MNT sur l'agglomération d'Antananarivo

Grace à ce Modèle Photographique Topographique, on peut avoir une visualisation du Terrain avec une altitude correspondant à l'altitude des sols.

Le problème se pose au niveau des coordonnées planimétriques du fichier mpt. En effet, le système de coordonnées de ce fichier mpt est encore en coordonnées UTM. Ceci vient du fait du géoréférencement

des images traitées pendant la restitution. Ce fichier mpt étant propre pour le logiciel terra explorer, on n'a pas su le géoréférencer en Laborde Madagascar.

### *3) Dossier de Démembrement*

Les dossiers du démembrement sont constitués par :

- Un acte de vente de la parcelle du bâtiment ;
- Une note de vérification ;
- Un procès-verbal de démembrement ;
- Un plan architectural de l'étage ou de l'appartement ;
- Un plan du titre foncier ;
- Une réquisition individuelle du propriétaire ;

Dans notre étude, ces dossiers devraient être complétés par l'enregistrement des coordonnées altimétriques ou l'élévation au cadastre actuel. Ces coordonnées altimétriques seront combinées avec les coordonnées planimétriques pour faire ressortir des coordonnées tridimensionnelles. Certes, le logiciel permet de retrouver cette altitude mais les coordonnées planimétriques non puisqu'elles sont encore définies par un autre système de coordonnées. Ces coordonnées planimétriques seront alors récupérées par le plan du titre foncier. Pour une unique visualisation, ces coordonnées tridimensionnelles seront affichées sur le plan architectural.

Pour mieux stocker ces données, les dossiers qui constituent le projet de démembrement seront scannés un par un puis convertis en format pdf. Puis, ils sont ensuite combinés un par un afin de les réunir en un seul groupe. Un groupe formé sera renommé par le nom du propriétaire.

Cet enregistrement pdf sera importé dans notre logiciel, puis inséré dans chaque lot (cf. II.3.b)

### *4) Choix de la zone :*

On a choisi un extrait de la zone d'Ampefiloha pour le premier prototype à réaliser puisque qu'il existe dans cette zone des bâtiments durs, des bâtiments présentant un système de copropriété.



Figure 28 : image bâtiment CEXAM Ampefiloha

## CHAPITRE II REALISATION DU PROTOTYPE CADASTRE 3D

### (CAS DE LA COPROPRIETE)

Suite aux différentes phases de présentation des données et des logiciels nécessaires, nous allons maintenant entrer dans la phase de modélisation. La réalisation de cette étape se divise en plusieurs parties qui dépendent de chaque logiciel employé. Chaque logiciel utilisé possède sa spécification pour en arriver jusqu'au prototype final.

#### I Prise en main des données

Dans cette partie, on utilise pour la première fois les données issues de la restitution photogrammétrie. Ces données sont encore des données brutes. Alors la première étape consiste à bien gérer les calques suivant la nature des détails, et la deuxième consiste à traiter les détails suivant la nature.

##### 1) *Gestion des calques dans AUTOCAD/COVADIS*

Durant la restitution photogrammétrique, les détails sont numérisés suivant les détails sur terrain. Chaque détail est intégré dans chaque calque qui lui correspond. Il existe des calques personnalisées en fonction de chaque société. Voici une liste de calques employées par la société SINTEGRA et qui est aussi employée par SARYTANY.

COVADIS Version 200x-8  
(C) Géomédia S.A. 1993-2006

COVADIS : LISTE DES CALQUES D'UN DESSIN						
Nom du calque	Couleur	Type de ligne	Objets		Etat	
0	Blanc	CONTINUOUS	3			
2_ALITUDE	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_AUTO-FB2-PSPI	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_AUTO-FB2H	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_CHEMINEE	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_CSPLTC	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_CSPLTD	Blanc	CONTINUOUS	4			
2_CSPLTG	Blanc	CONTINUOUS	15			
2_ESCALIER	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FA1	Rouge	CONTINUOUS	654			
2_FA1A	Rouge	CONTINUOUS	0			
2_FA1G	Rouge	CONTINUOUS	155			
2_FA1GS	Rouge	CONTINUOUS	0			
2_FA1I	Rouge	CONTINUOUS	0			
2_FA1M	Rouge	CONTINUOUS	1			
2_FAITIERE	Blanc	TIRET	8			
2_FB1B	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FB1B-DALLE	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FB1C	Blanc	CACHE	0			
2_FB1P	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FB1PP	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FB1R	Blanc	CONTINUOUS	191			
2_FB1S	Blanc	DISCONTINU	0			
2_FB2D	Cyan	CONTINUOUS	0			
2_FB2H-CONTINU	Blanc	CONTINUOUS	1			
2_FB2H-DISCONT	Blanc	DISCONTINU	0			
2_FB2H-PP	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FBS2RB	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FBS	Blanc	CONTINUOUS	0			
2_FC1	Blanc	CONTINUOUS	4			

Figure 29 : Extrait de calque de la restitution

Le principe est de faire départager une par une ces calques pour une bonne gestion de la modélisation 3D. Par exemple FA1 correspondant au bâtiment dur doit être séparé des autres types de détails existants.

La calque sélectionnée sera copiée et gérée dans une autre fenêtre Autocad. Dans cette autre fenêtre, les autres calques seront « purgées » et il ne doit rester que celles qui nous intéressent comme ici FA1. Le but est de former une seule calque par détails puisque ces calques seront gérées sous forme de couche dans la suite de notre étude. Si ces calques ne sont pas purgées, on aura un dessin avec plusieurs calques, donc on aura plusieurs couches inutiles. Ce qui peut désordonner notre travail.

Pour notre premier prototype, On a choisi le Bâtiment A sis à Ampefiloha. Ce bâtiment est constitué de plusieurs niveaux d'étages et chaque étage est composé de plusieurs appartements. Avant de commencer, il serait utile de séparer uniquement ce bâtiment de la restitution photogrammétrique et le copier dans une autre fenêtre Autocad. Dans cette fenêtre, on peut maintenant séparer les étages et les appartements.

## 2) Traitement par étage

Dans notre fenêtre actuelle, on a le bâtiment A sis à Ampefiloha choisi précédemment.

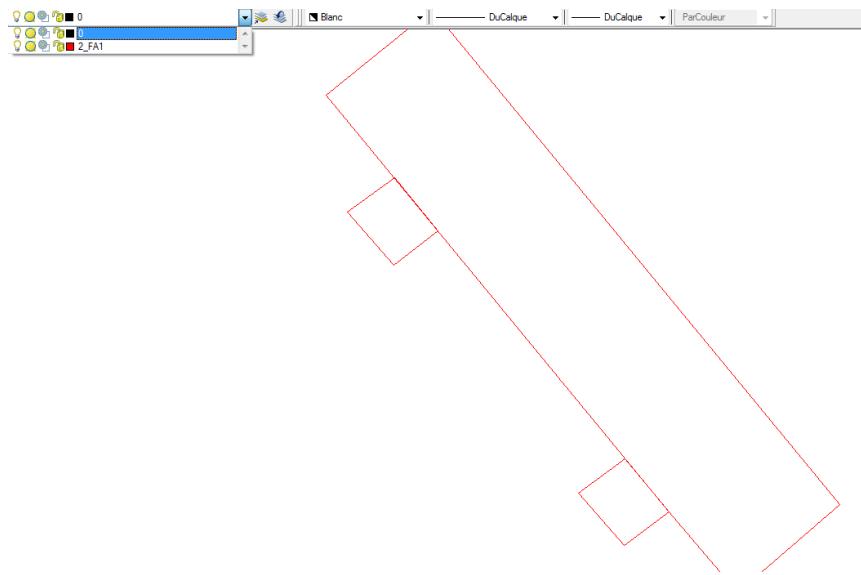


Figure 30 : Bâtiment A vu de dessus avec la calque

Notons qu'il est primordial de faire une descente sur terrain avant la numérisation du bâtiment. Cette descente consiste à une collecte d'informations sur le bâtiment. Ces informations peuvent être le nombre d'appartements, le nombre d'étages ou le plan du bâtiment s'il existe. Tous ceci nous faciliteront la tâche durant la mise en évidence de chaque appartement.

Ici, nous avons un bâtiment à 8 étages avec 48 appartements de divers propriétaires. Un étage est divisé en 6 appartements. La hauteur de chaque étage est de 3m avec une toiture de 1m pour le dernier étage. La hauteur des bâtiments serait alors de 25m environ. Celle de la restitution est de 25.57m environ. Ce qui nous permet de tirer une erreur entre 60 cm à 50 cm en altimétrie. La largeur de chaque appartement est de 8.53m environ. Le travail du Géomètre Topographe serait alors de vérifier ces mesures sur terrain et de retransmettre les données sur la numérisation des données.

Après récolte de ces informations, on extrude depuis le toit un par un chaque étage. Chaque étage sera divisé en 6 appartements selon sa largeur tout en gardant les mesures du bâtiment dans la restitution. Pour la séparation de chaque lot d'appartement, on utilisera des jeux de couleurs suivant chaque étage afin de mieux les distinguer. Chaque appartement doit avoir une calque personnalisée selon le choix. On a les résultats suivants :

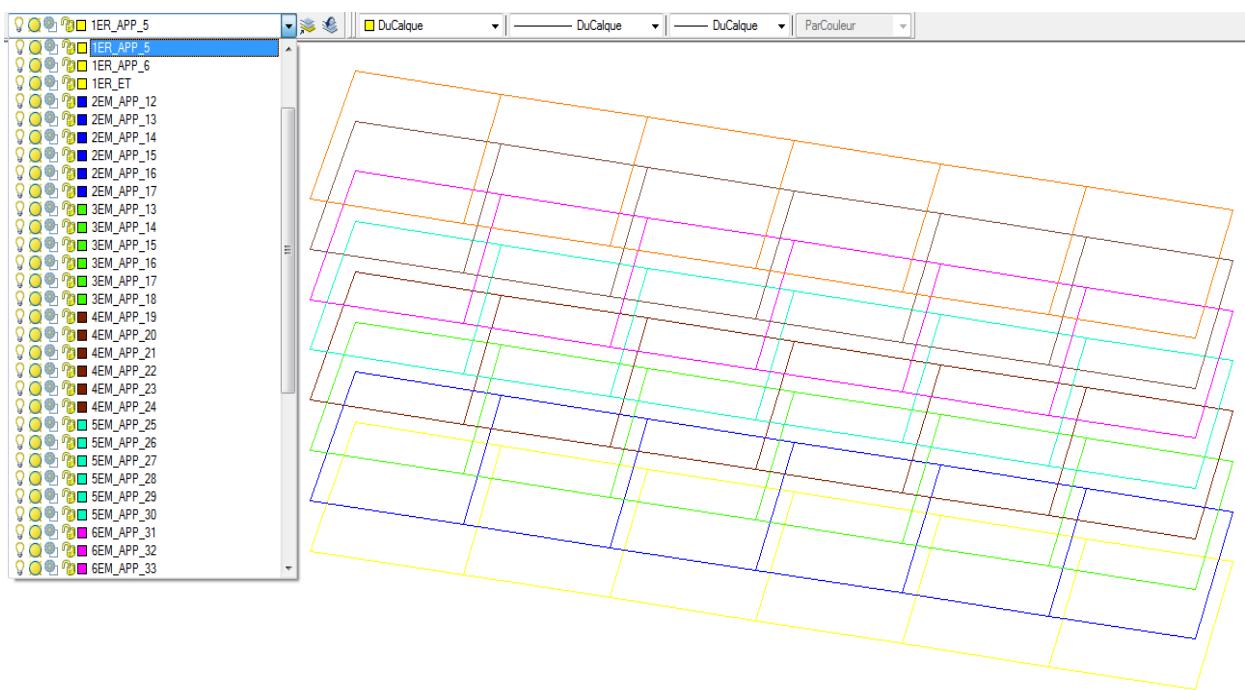
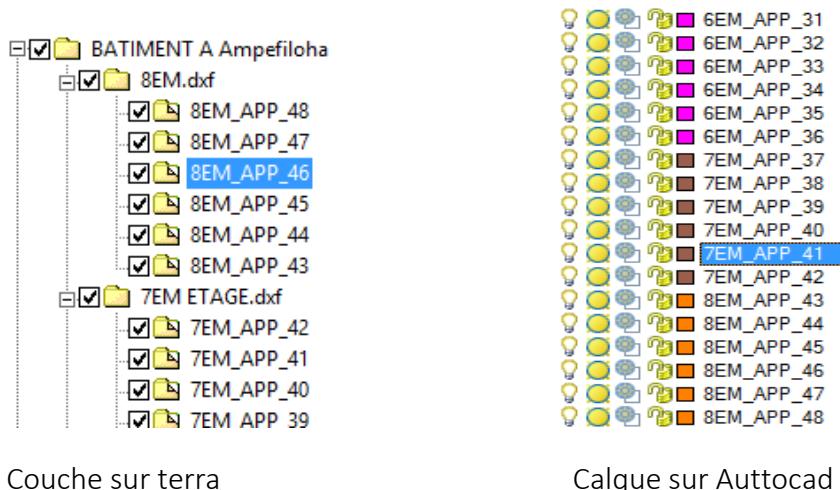


Figure 31 : Exemple de séparation des lots d'appartement

Chaque case signifie un lot d'appartement. Ces lots séparés seront gérés par un autre Logiciel (Terra explorer Pro) pour l'intégration des données. Dans notre calque, on représente chaque appartement par l'annotation : 1ER \_ APP\_6 qui signifie 1<sup>er</sup> étage appartement n°6.



Couche sur terra

Calque sur Autocad

Figure 32 : Comparaison entre calque sur Terra et calque sur Autocad

## II Gestion des bâtiments

### 1) Présentation des bâtis sur TERRA EXPLORER

La gestion des bâtiments 3D se fait sur Terra explorer. Ce logiciel nous permet de voir une vue d'ensemble des bâtiments ainsi que le Modèle Numérique du terrain sur un seul affichage. On obtient ainsi une carte 3D ponctuelle relative aux données issues de la restitution photogrammétrique.



Figure 33 : Illustration des bâtiments dans terra explorer

### 2) Gestion proposée

#### a) Annotation des parcelles

Actuellement, un bâtiment est géré sous forme d'adressage. L'adressage est une opération qui consiste à donner à un ou plusieurs objets destinés à designer celle-ci pour être connu de tous. L'adressage des bâtiments est le fait de repérer les bâtiments par intermédiaire de leurs adresses.

Le système d'adressage des bâtiments existe depuis la colonisation. Le système d'adressage a été créé de telle façon que les adresses des bâtiments sont définies suivant les routes. On ne peut pas se défaire de ce système déjà connus et employé par tout le monde. Ce système restera l'attribut principal dans notre devoir.

Terra explorer Pro est la base de notre étude car le prototype final sera géré et visualisé sur ce logiciel. La gestion des calques dans Autocad prend sa valeur puisque les calques créées seront importées et

prennent une forme de couche dans ce logiciel. Chaque lot correspond alors à une couche où l'on intégrera des données qui lui correspondent. Toutes les couches seront regroupées dans un dossier et seront renommées par l'adresse principale du bâtiment.

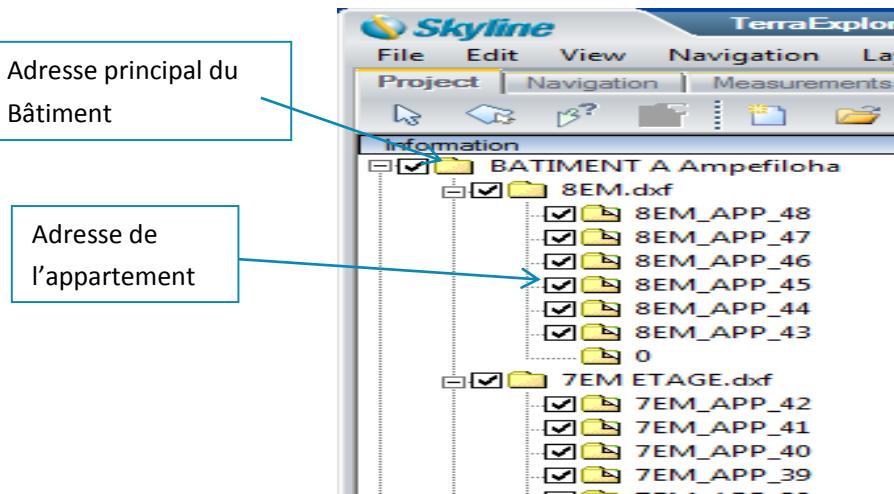


Figure 34: Présentation des calques importées dans Terra explorer Pro

Pour distinguer chaque appartement, on ajoute des annotations sur chaque parcelle. Lorsqu'on passe le curseur sur l'étage, le numéro de l'appartement s'affichera automatiquement. On reconnaîtra alors facilement chaque lot.

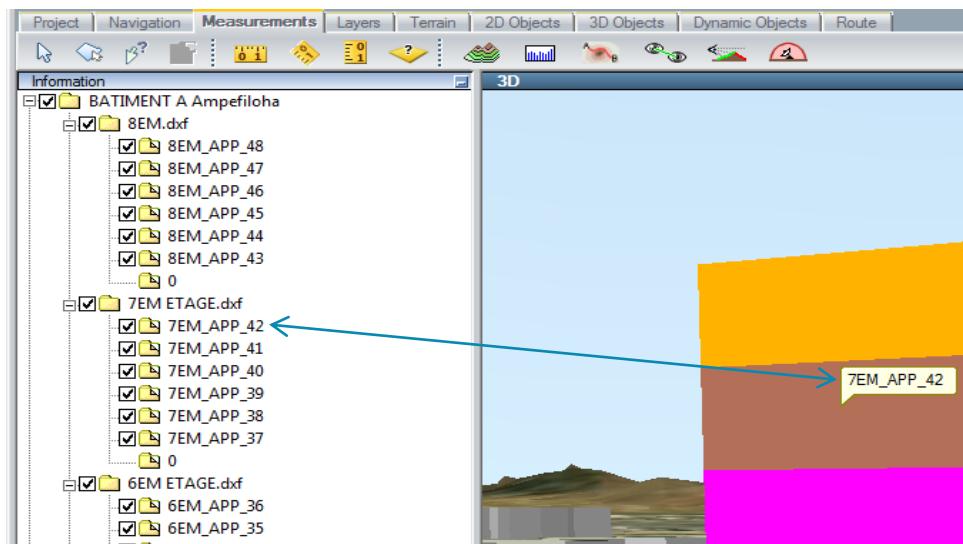


Figure 35 : Affichage de l'appartement

On peut aussi utiliser la zone de recherche dans le logiciel. En saisissant le nom de la parcelle, un contour jaune est affiché. Il sera indiqué dans ce contour la parcelle cherchée.

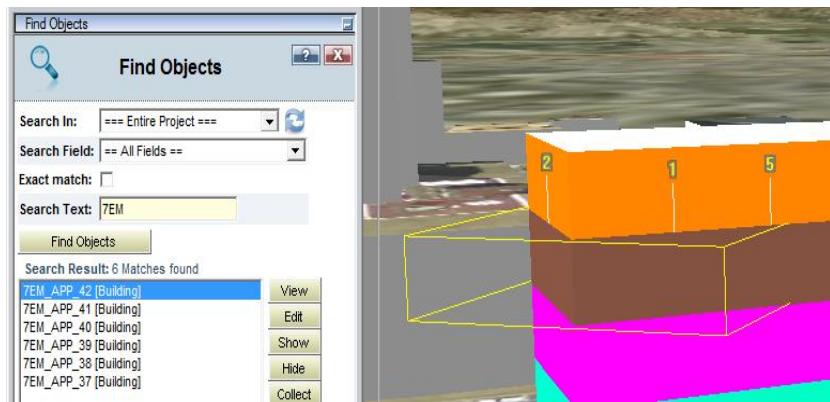


Figure 36 : zone de recherche

### b) Intégration des données

Après cette étape, on intégrera dans chaque couche créée les dossiers du démembrement scannés. Il faut bien s'assurer que les données intégrées correspondent bien à la parcelle des bâtiments. Enfin, il suffit juste d'un clic sur la parcelle de bâtiment pour afficher les données stockées.

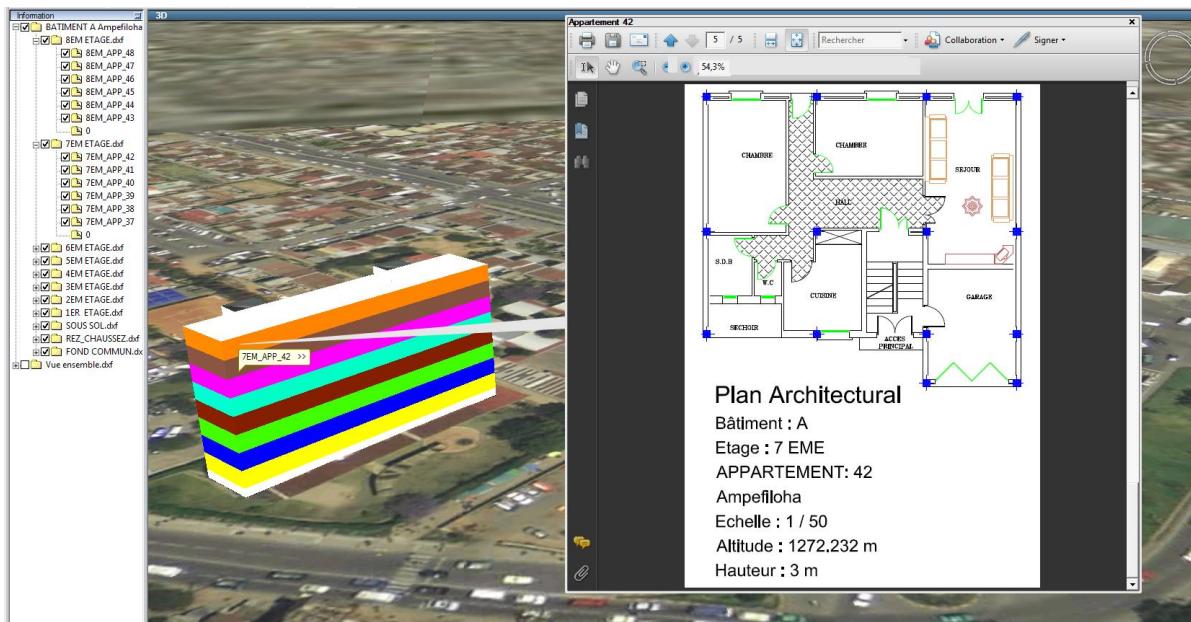


Figure 37 : Présentation de l'affichage du pdf stocké dans les parcelles

## RESUME

Ce prototype créé est un avant-gout sur le système Cadastre 3D surtout dans le cas de copropriété. On a établi une solution hybride pour prendre en compte la troisième dimension de certains objets cadastraux. L'intégration de la troisième dimension dans les systèmes cadastraux dans le cas des propriétés superposées est par contre limitée. Par exemple, l'enregistrement des parcelles volumiques dans le registre public et les plans cadastraux sont toujours en 2D. Par contre, on peut avoir certaines informations 3D telles que le volume de la propriété, l'altitude et la hauteur relative entre les étages d'un bâtiment.

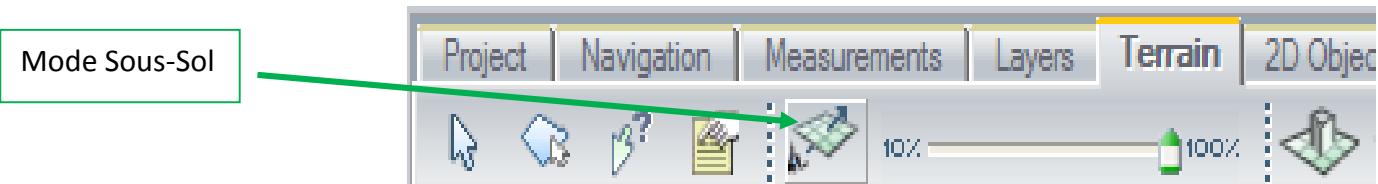
Un cadastre entièrement en 3D est encore indisponible. D'autant plus, aucun pays ne possède un cadastre purement 3D puis cela pourrait créer une déstabilisation totale du système cadastral.

### III Autres possibilités offertes

La gestion de ces réseaux enterrés fait partie intégrante du cadastre 3D alors que le sous-sol est incompréhensible sur un plan en 2D. Une représentation en 3D serait alors un atout complet pour un système de gestion du sous-sol et de mieux comprendre ces situations. Les réseaux souterrains ont l'avantage d'être très utile tout étant parfaitement invisibles, ce qui peut être un inconvénient quand on parle de relevé topographique. De plus, les méthodes de levés topographiques ne peuvent aussi intervenir. Ainsi, ce paragraphe suggère une solution pour le sous-sol ainsi que des situations complexes en milieu urbain. Tous ceci en gardant les données de la restitution photogrammétrique.

#### 1) Modélisation du Sous-sols

On ne peut pas réaliser une modélisation des réseaux souterrains à partir des données de la restitution photogrammétrique [Rev 64]. Seul le plan de construction du bâtiment peut donner une solution. Le problème est que ce plan ne suffit pas pour créer une gestion complète en 3D, tant que juridique ou technique. La solution serait alors de compléter les données de la restitution avec le plan du sous-sol. Pour la réalisation de notre prototype, on prendra comme exemple le même bâtiment que nous avons vu auparavant. Ce choix est fait parce qu'il n'y a pas de bâtiment à sous-sol dans la partie des données de la restitution que l'on m'a donné pour mon thèse.



Notre logiciel (Terra Explorer Pro) offre une solution à ce problème car il permet de faire une modélisation 3D au-dessous du sol, à partir de la MNT que nous utilisons. Ainsi, la modélisation est donc effectuée intégralement sur Terra explorer.

Basé sur la restitution et le plan du bâtiment, on extrude le bâtiment à partir de l'altitude au sol suivant sa profondeur vue dans le plan. Par exemple l'altitude au sol de notre bâtiment est de 1250m, la profondeur du sous-sol est de 3m. L'altitude du bâtiment en prenant compte du sous-sol serait alors de 1247m. En attribuant cette altitude, le sous-sol sera créé au-dessous du MNT. Ainsi, les coordonnées restent les mêmes que celles du MNT et la profondeur reste ponctuelle à celle du plan. Le sous-sol créé, on peut ajouter des données comme des livres fonciers que l'on a déjà vu auparavant.

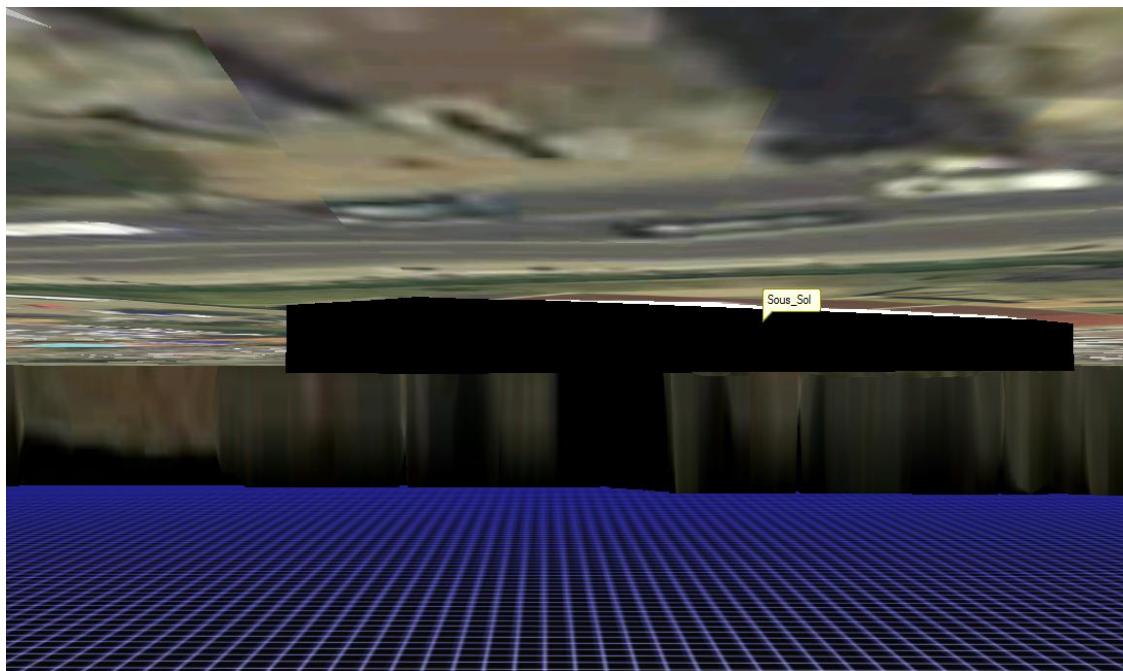


Figure 38 : Image du sous-sol

Dans un futur proche, l'homme étendra sa propriété dans le bas fond. Il ne serait plus alors invisible puisqu'une représentation 3D de sa propriété est affichée. Il peut ainsi sécuriser son bien fond.

## 2) Modélisation des scènes urbaines

On peut aussi citer comme l'un des cas de propriétés superposées les routes qui traversent beaucoup de parcelles. Il existe quelques zones à Tanà-ville où l'on peut trouver ce cas de superposition comme le cas des Tunnels situés en plein ville. Les tunnels sont les biens de l'état, au-dessus se trouve des biens individuels. Il est donc nécessaire de modéliser ces parties afin de mentionner des immeubles se situant au-dessus des domaines privés de l'état. On peut ainsi dans un autre cas, créer une base de données pour gérer ces biens de l'état, tout en utilisant en sécurité, les parties exploitables.

Le but de l'étude précédente est alors de modéliser une scène pour créer un bloc 3D utilisable par d'autres logiciels. Deux logiciels interviennent pour la modélisation en 3D de ces scènes urbaines.

a) sur Autocad

Dans notre cas actuel, la spécification des calques n'est pas vraiment nécessaire. Il faut juste bien distinguer chaque détail pour une meilleure modélisation 3D. La modélisation des bâtiments est l'étape la plus longue et la plus difficile. Il faut extruder un par un chaque sommet du bâtiment suivant l'altitude au sol. Ces altitudes sont données durant la restitution. Pour les autres détails, il n'est pas vraiment nécessaire d'extruder les bâtiments. Par contre, des clichés images sur des parties à modéliser seront nécessaires afin de s'orienter pour chaque détail.

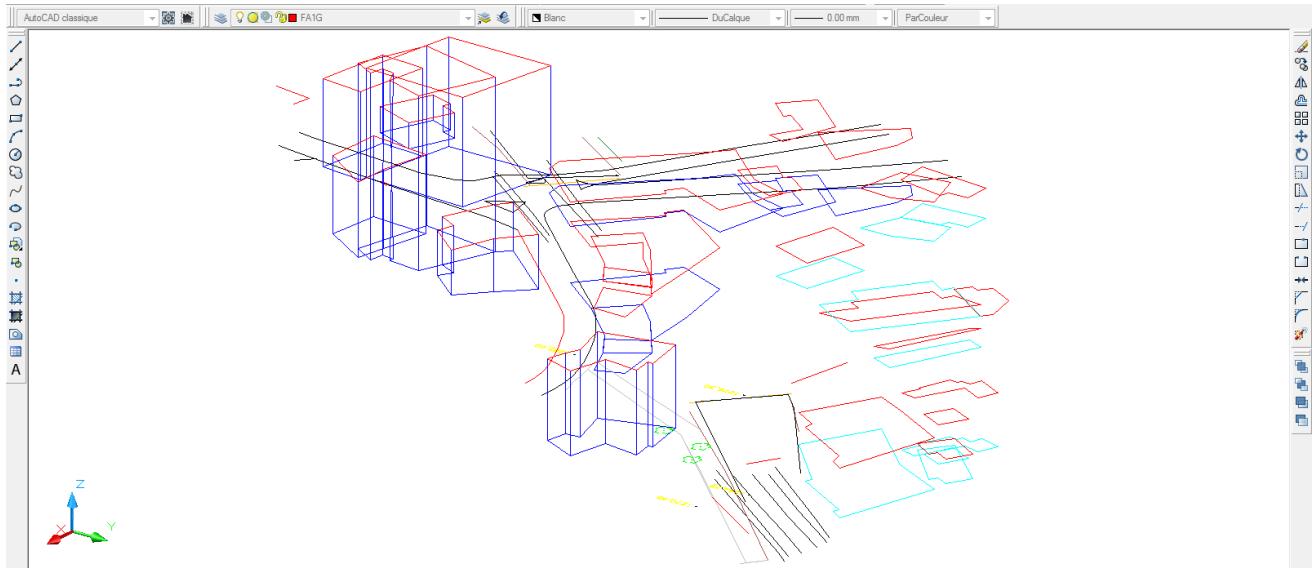


Figure 39 : Restitution du Tunnel Ambohijatovo sur Autocad

#### b) Modélisation sur Google Sketchup

Google Sketchup est un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie orienté vers l'architecture. Ce logiciel se caractérise par des outils simples (rotation, extrusion, déplacement...) qui font d'un logiciel 3D très différent des modeleurs 3D classiques. Son originalité repose essentiellement sur le principe de l'inférence. Le logiciel propose lui-même une action de modélisation appropriée au contexte de créer une face, de l'extruder, la diviser, la découper selon la courbe dessinée, de faire une coupe directement sur l'objet suivant l'action désirée. Ces techniques permettent une création de dessins et de forme plus rapide, basée sur des volumes, des formes et des esquisses directement sur l'objet. L'avantage de l'utilisation de ce logiciel est sa capacité de compatibilité avec beaucoup de logiciels. On peut y importer plusieurs types de format 3D ainsi que divers fichiers images.

Avant la modélisation, on importe le fichier sur autocad (.dwg) dans Goolge Skechup.

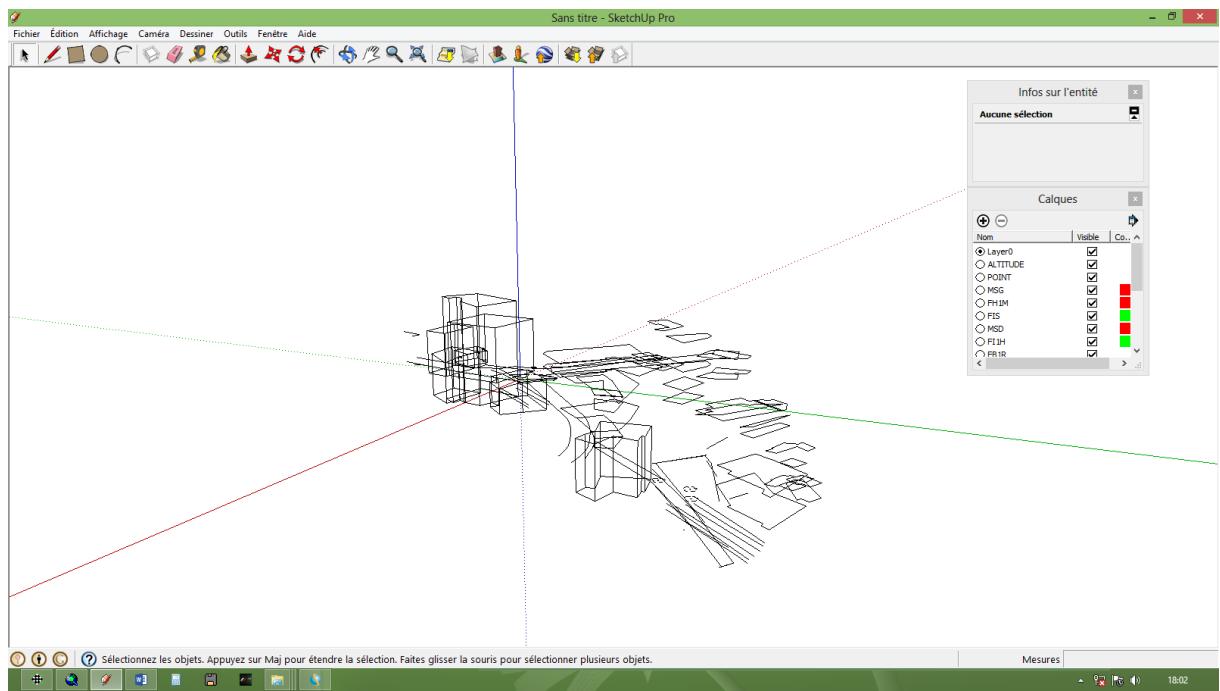
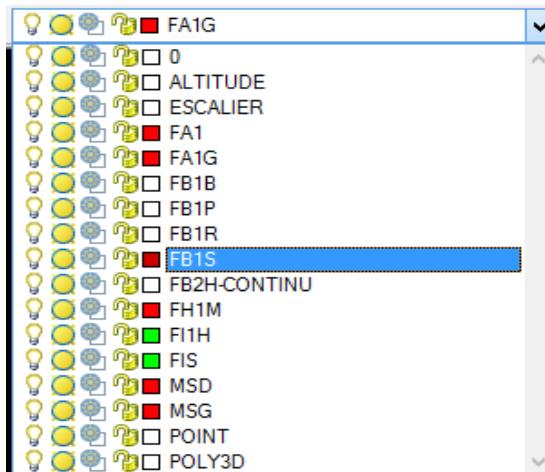
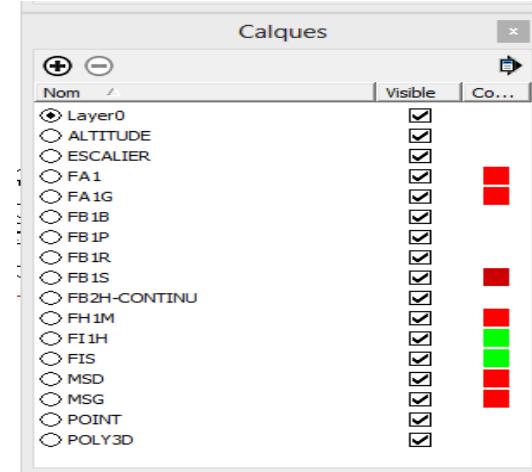


Figure 40 : Import dans Google Sketchup

Les calques et l'échelle dans Autocad sont récupérés dans Google Sketchup. Ce qui marque l'un des avantages de ce logiciel puisque la modélisation reste homogène.



Calque sous Autocad



calque dans Google Sketchup

Figure 41 : Comparaison entre calque sur Autocad et Google Sketchup

Divers outils permettent de réaliser une facette 3D suivant les arrêtes des bâtiments ou des détails sur terrain. On peut avoir un modèle proche de la réalité et facile à comprendre pour l'utilisateur.

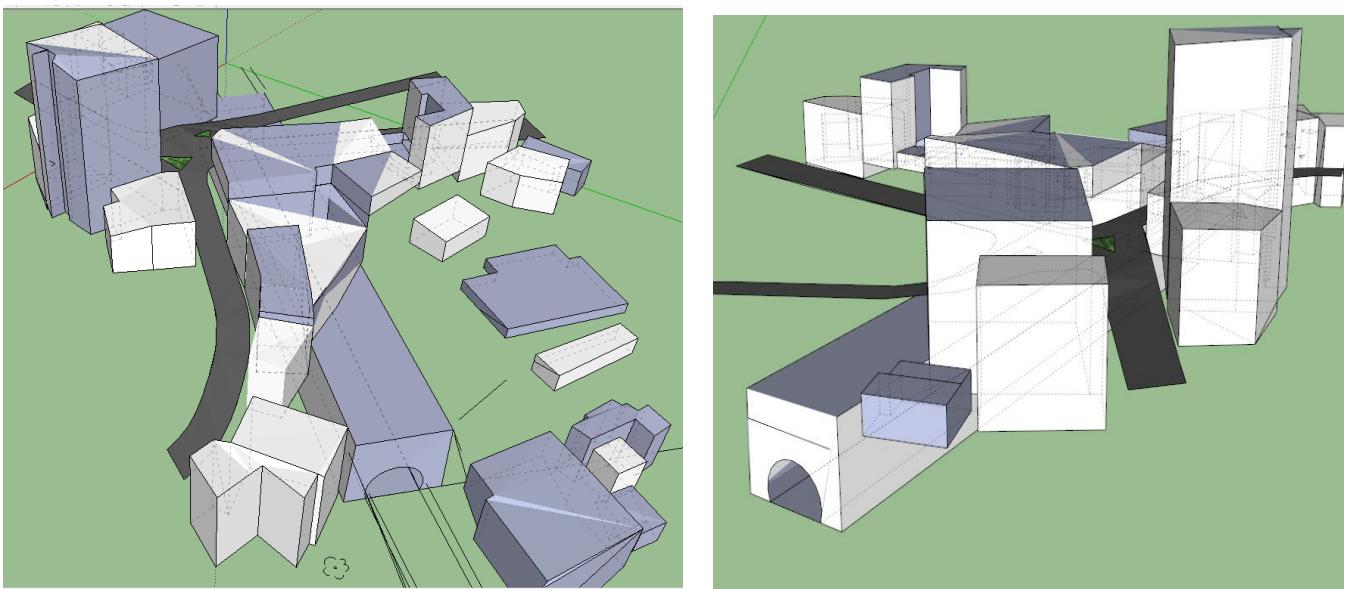


Figure 42 : Modélisation 3D Tetezana Ambohijatovo

Cependant, le modèle créé sous Google Sketchup pourrait y satisfaire. L'import des données sous Sketchup depuis Autocad ne subit pas de déformation des objets. Ce modèle peut être exporté en plusieurs types de format 3D compatible avec plusieurs logiciels.

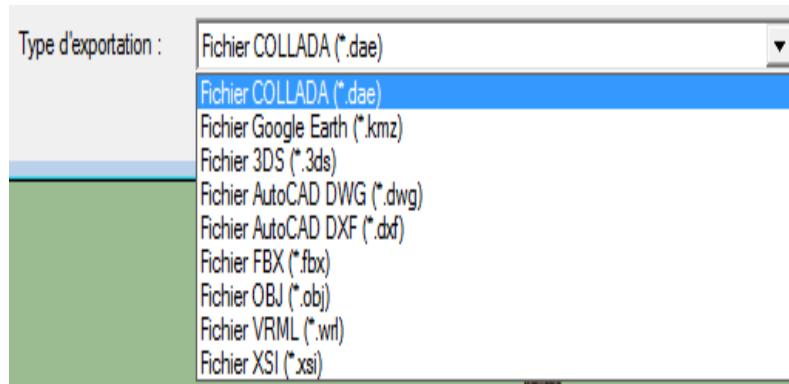


Figure 43 : Type d'export de format par Google Sketchup

### *3) Modélisation de restrictions publiques*

Il existe plusieurs détails dont on peut prendre en compte à partir de la restitution photogrammétrique. Ces détails sont en général des infrastructures publiques, des monuments, des sites naturels devront être aussi représentés.

Avec cette représentation, on peut les introduire dans une gestion cadastrale. On appelle ce système de représentation dans d'autre pays, le cadastre des restrictions de droit public à la propriété foncière.

Ces restrictions appartiennent à 8 domaines différents : l'aménagement du territoire, les routes nationales, les chemins de fer ; les aéroports, les sites pollués, les protections des eaux souterraines, le bruit et la forêt comme le montre la figure ci-dessous.

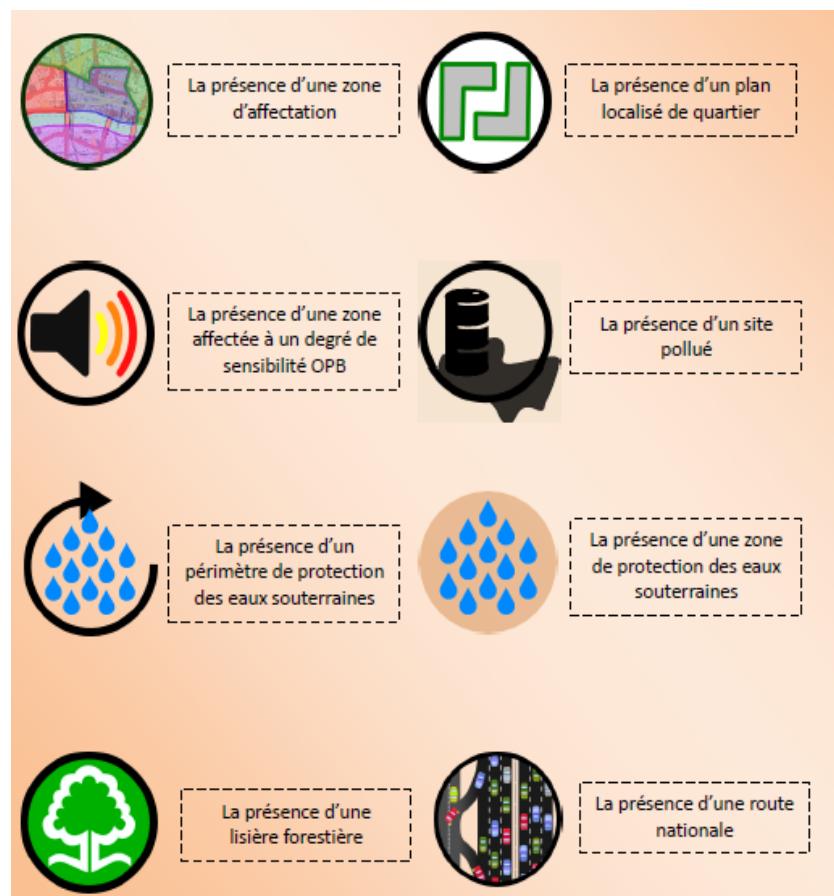


Figure 44 : Quelques exemples de représentation simplifiée du cadastre RDPPF

Ces logos sont affichés sur l'ensemble du cadastre 3D afin de notifier pour l'utilisateur la présence des restrictions publiques. On sera donc averti de l'existence de ces restrictions avant toute installation. Ce cadastre RDPPF, au sein d'un SIG orienté en 3D, permettrait une fois celui-ci fonctionnel, de contrôler ou de vérifier le respect de différentes restrictions de droit public. De plus, il pourrait être simplifié en visualisation 3D. Par exemple les gabarits de construction, l'implantation des bâtiments par rapport à son environnement [Isabelle 2010] [Miserez 2010] [Gaëtan 2012].

#### 4) Rôle du géomètre expert

Dans un futur proche, les grandes installations telles que les grands « buildings » prendront place dans les zones urbaines. Le Géomètre Expert jouera un rôle important face à cette évolution. Il sera donc nécessaire de créer un système graphique pour la gestion de ces bâtiments. Le prototype créé auparavant offre une solution mais nécessite encore l'intervention du Géomètre Expert. Le rôle du Géomètre Expert proposé serait alors de vérifier les mesures par rapport aux données

photogrammétriques, d'effectuer une mise à jour du plan 3D en cas de nouvelle construction, de reconstruire les dossiers du requérant au sein du service. On évoquera dans ce paragraphe, une approche au sein du service foncier. Plus précisément, le rôle des Géomètre Expert dans ce système.

#### *a) Vérification des mesures*

Pour plus de précision, une vérification des mesures sur terrain est un atout considérable. Cette vérification peut être effectuée par des levés tachéométriques ou par chaînage du bâtiment. Ces mesures seront comparées par les données de la restitution et on peut les corriger si nécessaire. De plus, on peut notifier ces mesures, dans un procès-verbal destiné au projet de l'immatriculation de l'immeuble. Elles peuvent aussi servir comme repérage pour d'autres études comme la mutation ou morcellement des parcelles du bâtiment.

#### *b) Mise à jour du plan 3D*

On ne peut pas se défaire de l'éventualité d'une mise à jour des plans 3D. Le problème est qu'un levé photogrammétrique peut coûter cher pour l'Etat. La solution serait alors d'effectuer des levés directs sur terrain comme on a vu dans la vérification des mesures.

Dans le cas des constructions complexes telles que les buildings, le levé direct rencontre des problèmes surtout en hauteur. La solution est donc une modélisation 3D du bâtiment à partir du plan de construction du bâtiment. Actuellement, les architectes établissent des plans où l'on peut voir toutes les informations complètes du bâtiment telles que la hauteur, la spécification de chaque étage, ses dimensions, ses plans 3D...

On peut importer des modèles 3D dans notre logiciel Terra explorer. Ainsi, on reconstruit le bâtiment par ces informations et de préférence dans Autocad pour l'insertion des coordonnées. Le Géomètre Expert chargé du projet devra alors dans ce cas, effectuer des levés GPS sur les lieux pour les coordonnées du bâtiment. Le mieux serait de piquer par GPS chaque coin de la base du bâtiment. Les points levés seront ensuite insérés dans chaque coin de base dans le dessin 3D sur Autocad. La base reconstruite, on modélise un par un chaque étage suivant la hauteur définie dans le plan effectué par l'architecte. Pour contrôle, un levé photogrammétrique devrait être envisagé tous les 10 ans.

#### *c) Dossier des requérants*

Comme d'autres travaux effectués au sein du service, le Géomètre Expert devrait être en charge du dossier du requérant. Effectivement, l'installation des nouveaux systèmes engendre des modifications surtout au niveau de l'enregistrement des actes notariés.

Le Géomètre Expert devra établir dans ce cas, un plan vertical en deux dimensions montrant l'objet physique appartenant au requérant. Ce plan donnera un aperçu de l'immeuble et la limite de chaque étage. Une ligne épaisse noire indiquera les limites de l'appartement c'est-à-dire la zone appartenant au requérant. En complément de cette ligne noire, le requérant est dans l'obligation de nommer l'objet afin de bien le distinguer des autres. Par exemple MAHATSINJO XVI. Les informations complémentaires seront vues au sein du service foncier.

## RESUME

Les modèles numériques tridimensionnels urbains représentent souvent le modèle de base d'un système d'information topographique (SIT) dont la précision est directement à mettre en relation avec celle du modèle qui lui sert de support. Jusqu'à présent, la photogrammétrie numérique aérienne est considérée comme l'une des techniques la plus performante et la plus employée dans le cas de la génération de maquettes numériques 3D dans un environnement urbain. On peut découdre de ce système proposé, une initiation à ce que le prototype cadastre 3D peut représenter dans notre pays.

Cependant, le développement croissant des techniques d'acquisition aérienne de type LiDAR constitue à présent, une seconde source très importante des modèles tridimensionnels urbains surtout pour les procédures d'extraction d'objets 3D. La suite de ce devoir est de faire ressortir une perspective LiDAR sur le traitement des nuages de points dont le but d'une modélisation 3D.

## CHAPITRE III PERSPECTIVE LiDAR

Ce chapitre vise à montrer l'avantage du LiDAR par rapport au Photogrammétrie Numérique. Par l'insuffisance des données LiDAR à Madagascar, surtout en milieu Urbain, on va prendre un extrait de données LiDAR à l'étranger. La modélisation serait alors un exemple de ce que ce type d'acquisition aérienne pourrait être avantageux.

### I Traitement des données brutes

Le traitement des données LiDAR représente une tâche importante de la chaîne de production. Tout d'abord, le filtrage consiste à classer les points du nuage afin d'en retirer les informations pertinentes quant au type d'objet sol, bâtiments, végétation ou autres. Les informations à disposition pour filtrer les points sont : la position 3D de chaque point, le type d'écho, l'intensité et l'amplitude de retour.

#### 1) *Notion de nuage de point*

Les produits bruts obtenus par le LiDAR sont des nuages de points ou « point cloud ». Chaque point correspond à un impact du faisceau laser sur un obstacle de la surface topographique. La chaîne de traitement des données permet d'obtenir un nuage de points en 3D géoréférenciable dans tout système de coordonnées. Ces nuages de points ont une densité de 1 à 50 points/m<sup>2</sup> de point semis brut et de 0.2 à 10 points/m<sup>2</sup> au sol selon le contexte. Pour chaque point, l'utilisateur dispose des informations suivantes :

- La position 3D (X, Y, Z) ;
- Coordonnées WGS 84 (GPS) à transformer en coordonnées usuelles ;
- Points séparés lors d'échos multiples, une impulsion peut produire jusqu'à cinq échos ;
- Heure précise de l'impact ;
- Intensité du signal de retour qui est en général exprimée en octet.

Ces points seront classifiés par catégories pour former les détails du terrain.



Figure 45 : Vue isométrique d'un nuage de point

## 2) *Préparation des données*

Avant de procéder aux traitements des nuages de points LiDAR, la première étape consiste à préparer les données brutes collectées pendant le levé. C'est une opération automatisée et exécutée par la société qui a effectué la campagne de mesures, car ces dernières sont souvent enregistrées dans un format propriétaire, associées à l'instrument utilisé. Si le client désire effectuer lui-même les traitements, il est recommandé de spécifier dans quel format numérique les données doivent lui être transmises. Comme cela a déjà été vu dans le chapitre Acquisition, les données brutes sont généralement converties dans un fichier standardisé à l'extension LAS.

Les informations enregistrées par le récepteur INS/GPS donnent accès à ses coordonnées tridimensionnelles dans le système géocentrique WGS84 qui est aussi celui de repérage des satellites servant aux mesures. Le WGS84 est un système développé pour une utilisation mondiale mais qui nécessite d'être projeté dans un système national (ou local) plus adapté.

## 3) *Contrôle des données*

À l'exception de certains projets linéaires, l'acquisition en LiDAR s'effectue toujours avec un recouvrement entre bandes. La procédure courante est de vérifier la coïncidence des objets dans ces zones en recouvrement. Généralement, une image, soit d'élévations, soit d'intensités, est interpolée selon une grille régulière, à partir du nuage de points issu de chaque axe de vol. Les deux images sont ensuite comparées. Plus l'écart est petit, plus la qualité des données est meilleure.

D'autres modules implémentés dans certains logiciels professionnels fonctionnent selon le principe de la détermination du degré de coplanarité entre deux nuages de points en recouvrement. Ce type de contrôle permet de mettre en évidence un biais.

Une gestion du fichier LAS consiste à attribuer à chaque point une étiquette en fonction de ses caractéristiques.

- *Attribut associés au point*

Un nuage de points peut être accompagné d'attribut dans le fichier LAS. Ces attributs peuvent être la position de l'Echo dans le signal retour, la valeur de l'intensité, l'axe de vol.



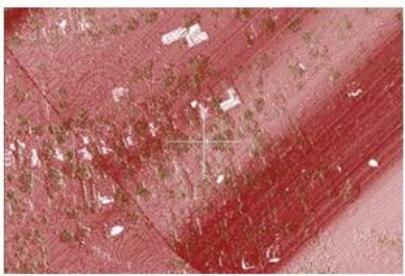
Nuage de points représenté selon la valeur Z



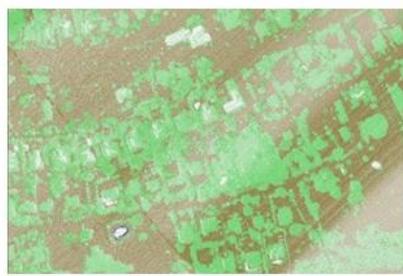
Nuage de points représenté selon la valeur de l'intensité



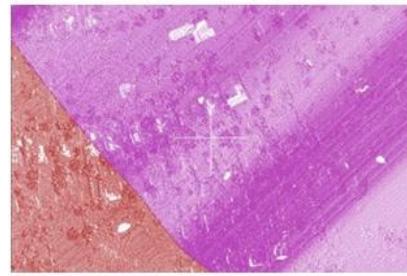
Nuage de points représenté selon les valeurs de Z et de l'intensité



Nuage de points représenté selon la position de l'écho dans le signal retour



Nuage de points représenté selon la classification



Nuage de points représenté selon l'axe de vol

Figure 46 : Représentation des nuages de points selon divers caractères

- *Suppression des points inutiles*

Les points bruités ont diverses origines : ils peuvent être issus de la rencontre du faisceau laser et d'un artifice comme un avion volant à basse altitude, un oiseau ou encore un aérosol atmosphérique ; ou bien ils peuvent être le fruit du multi-trajet du signal lumineux.

En post-traitement, il conviendra d'identifier les points bruités et de les classifier comme tels. Les logiciels utilisent des filtres automatiques, ou créent une échelle colorimétrique basée sur la reconnaissance des élévations minimum et maximum : un filtre par bandes délimitées, préalablement paramétré, permet de classifier les points bruités et de les ignorer dans la suite des traitements.

- *Attribut selon l'écho*

Il existe dans certaines études où l'on accorde beaucoup d'importance sur la position de l'écho dans le signal retour. Comme nous avons vu auparavant, il existe deux types d'écho : l'écho simple et l'écho multiple.

Si le signal retour est composé d'un seul écho, cela signifie que l'impulsion a frappé une surface solide, qui peut être soit le sol, soit un bâtiment, soit une végétation. Ces points doivent être associés à la catégorie "écho unique".

Si le signal retour est composé de multiples échos, cela signifie que l'impulsion a frappé soit la végétation, soit un objet susceptible d'être traversé, tel qu'un pylône. Dans ce cas, le premier écho et le dernier écho doivent respectivement être associés aux catégories "1er écho d'une série d'échos" et "dernier écho d'une série d'échos".

Les points qui ne rentrent ni dans l'une, ni dans l'autre de ces couches sont attribués à la catégorie "écho intermédiaire d'une série d'échos"

#### *4) Méthodologie de traitement*

La méthodologie de traitement dans le LiDAR est presque la même que celle de la photogrammétrie. Le principe est le même, celui de classifier les détails selon leur nature urbaine. L'avantage du système LiDAR est le nombre de détails qu'il peut prendre en compte. Dans notre étude, on va citer les zones « batiments », « végétation », « sol », « bruits ». La classe bruit regroupe tous les objets que l'on ne souhaite pas modéliser comme les voitures, les lignes électriques... Notons que pour l'application d'un cadastre 3D RDPPF, il est nécessaire de prendre en compte tous ces détails. Pour le type de modélisation, une intervention des primitives 3D est à prendre en compte. Ceci se joue en général dans les logiciels spécifiés.

## **II Phase de Prétraitement**

La phase de prétraitement est la première prise en main des données. Avant de commencer, on va un peu détaillé le logiciel utilisé puis la technique de chargement des nuages de points et quelques étapes obligatoires avant toute classification des points.

#### *1) Logiciel*

Le logiciel de filtrage de points laser permet d'automatiser une bonne partie du traitement mais un contrôle et une édition manuelle restent indispensables.

Actuellement, la société SARYTANY utilise la version v8 de 2004. Ce logiciel est intégré avec des modules de TerraScan et TerraModeler qui sont vraiment utiles pour le traitement des données LiDAR. Ce logiciel permet donc de traiter les nuages des points bruts obtenus après levé aéroporté.

### (1) Fichier .DGN

La donnée d'entrée du logiciel Microstation est le fichier DGN. Un fichier DGN est constitué d'un ou plusieurs modèles dont chacun est représenté à l'aide d'éléments tels que des lignes, des arcs et des formes. Le menu Fichier de MicroStation comporte des options pour la création ; l'ouverture et l'enregistrement des fichiers DGN. On peut également effectuer ces opérations de gestion de fichiers et d'autres, à l'aide de la boîte de dialogue MicroStation Manager.

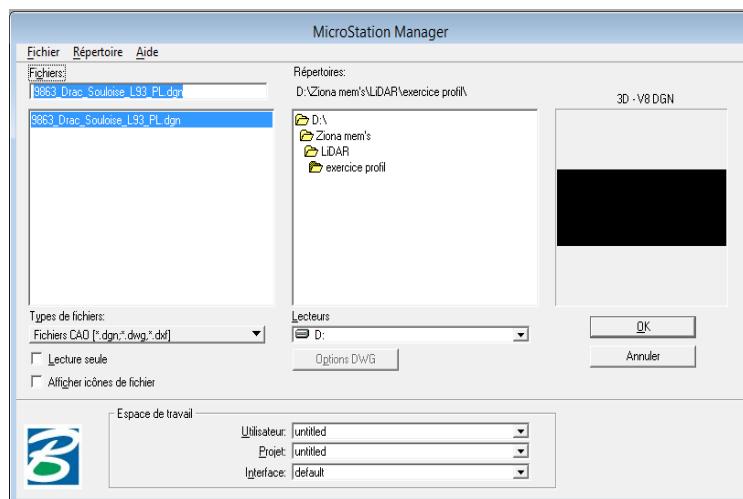


Figure 47 : Ouverture du fichier DGN

### (2) Fichier .LAS

L'ASPRS est la première à avoir proposé le format LAS dès 2003. Il s'agit d'un format d'inter-échange de données tridimensionnelles, en particulier pour les nuages de points. Le format binaire LAS est une alternative aux formats propriétaires des constructeurs. Il contient toutes les informations spécifiques au système et à l'acquisition LiDAR. Le contenu du fichier LAS est riche : l'identifiant du point, les coordonnées X, Y et Z, la valeur de l'intensité, le nombre d'échos par impulsion, les mesures GPS et inertielles, l'angle instantané de scannage, la date et l'heure ainsi que les caractéristiques du système LiDAR sont quelques-unes des informations y figurant. Toutes ces données ne sont pas toujours utiles, mais il faut savoir qu'elles existent.

## 2) Chargement du bloc

### a) Chargement des points

Le chargement des points se fait dans TerraScan. Les points sont sous format .las qui est un fichier du nuage de point Laser.

Une option « Read points » dans TerraScan permet de charger ces points.

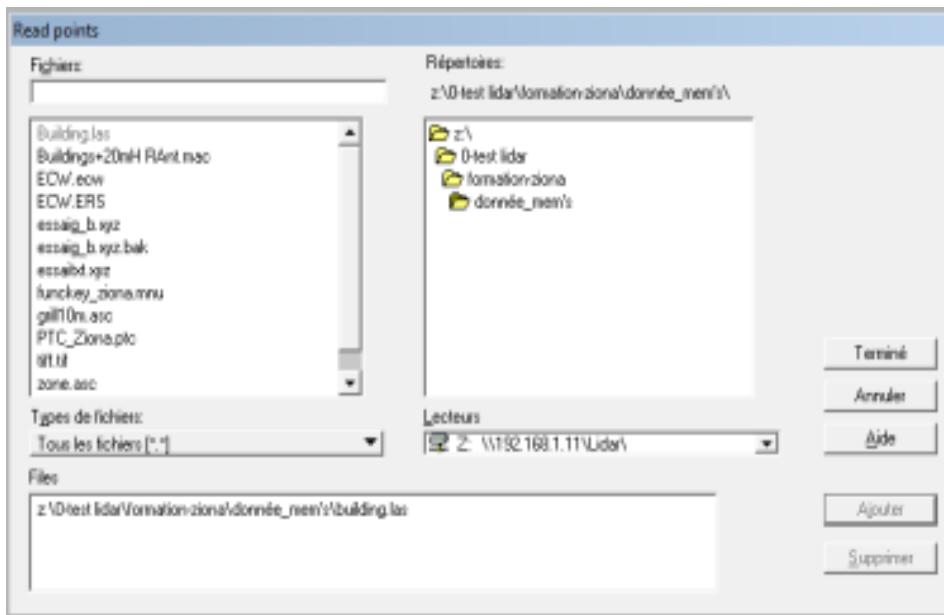


Figure 48 : Chargement des points LAS

Pour bien mener le travail, il faut créer un bloc où les points doivent être répertoriés. Ce bloc est un fichier prj dans TerraScan. C'est un fichier de projet où sont enregistrés les fichiers .dgn et .las.

### b) *Chargement des fonctions*

Cette étape consiste à une phase de synchronisation des vues et une création des touches de fonction.

#### (1) *Synchronisation des vues*

A SARYTANY, on utilise deux écrans en réseau puisqu'il faut un espace d'affichage assez large pour la classification des points. Ces deux écrans doivent être synchronisés. Dans MicroStation, il existe différentes vues qui correspondent à des fenêtres différentes. La synchronisation des vues nous permet de synchroniser les actions dans chaque fenêtre.

Ceci est vraiment nécessaire dans la filtration des points

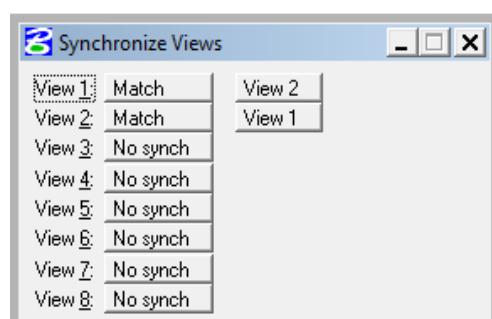


Figure 49 : Syncrhonisation des vues

Cette boite signifie que l'action effectuée dans la fenêtre « View1 » correspond à celle de la fenêtre « View2 ».

### (2) *Création des touches de fonction*

Avant d'entamer la classification, il est nécessaire de personnaliser des touches de fonctions. Ces touches de fonctions servent de raccourci à partir du clavier pour chaque classification choisie.

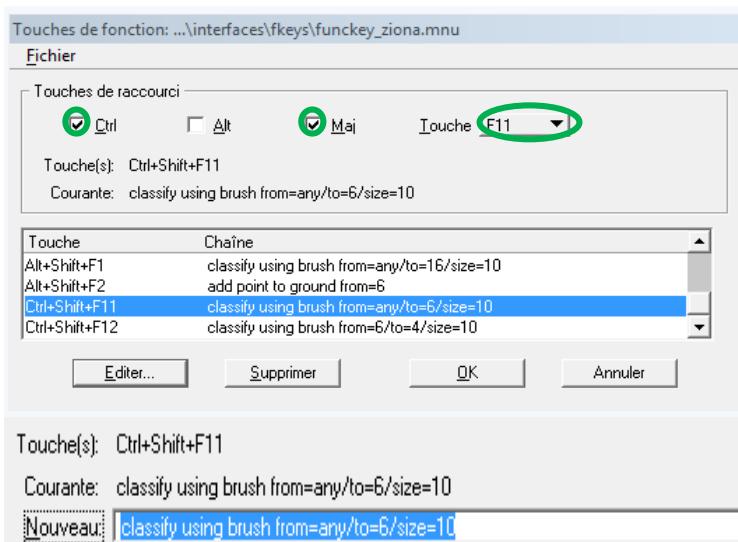


Figure 50 : Personnalisation des touches

« Classify using from = ... » : entrer la valeur de la classification que l'on veut changer

« To =... » : entrer la valeur de la nouvelle classification

« size = ... » : taper la taille de saisie pendant la classification

## II Filtrage des points

### 1) *Création du Modèle Numérique du Terrain*

L'étape de la création du MNT est une étape primordiale avant tout filtrage car il permet de voir la morphologie du terrain.

Une fois les points chargés, il faut créer une surface à partir de ces points. Cette création de surface se fait dans Terra Modeler. Cette surface doit être créée à partir du class « Ground » car on veut avoir une modèle du terrain. Cette surface est un type de fichier .t00 de TerraModeler.

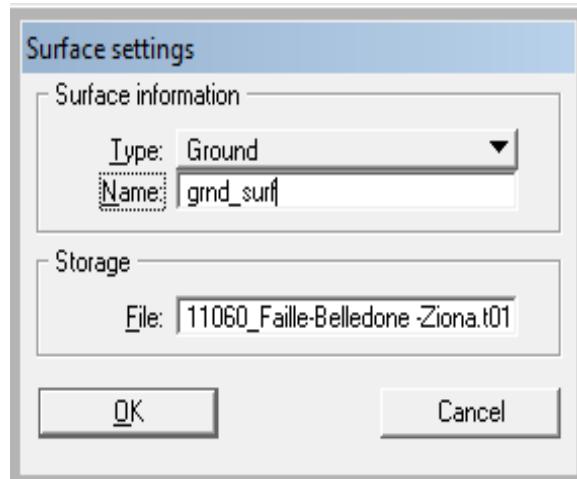


Figure 51 : Calcul de surface

Après le calcul du Surface, un paramétrage du MNT est nécessaire pour une bonne visualisation.

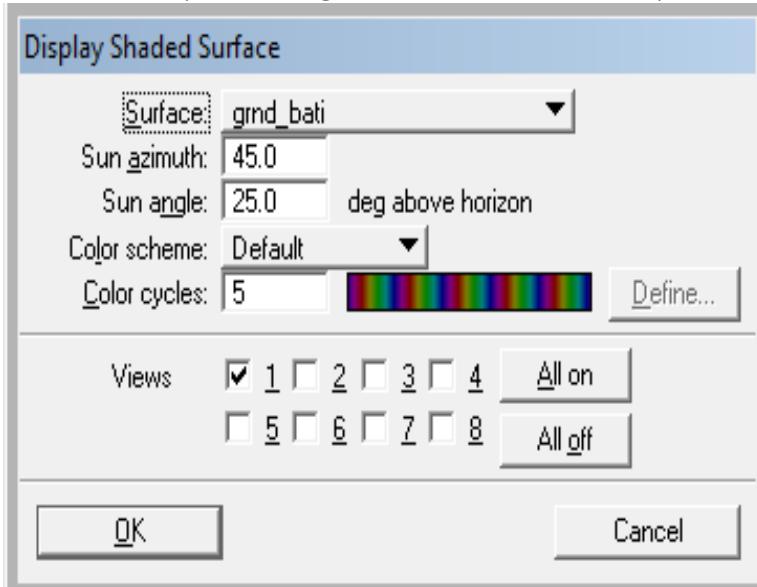


Figure 52 : Paramétrage du MNT

Le « Sun azimuth » et le « Sun angle » sont les paramétrages du soleil. Ils entrent vraiment en scène dans les cas d'une prise de vue sur les collines ou les terrains à grandes pentes. Dans notre étude, on fixe à 45° l'angle du soleil azimuth et 25° l'angle su soleil.

Le « colors cycles » est composé de différentes couleurs. Un bon paramétrage peut donner une meilleure visibilité des déformations sur le modèle ombré.

La surface paramétrée, le modèle ombré est reconstruit automatiquement. On peut maintenant commencer les filtrages des points.

Le filtrage des points est une étape qui consiste à classifier les points selon leur nature sur terrain. Les points sont classifiés en 2 types par défaut : « class 0 ou Unclassified ».

## 2) Création d'une classification

Pour ajouter une nouvelle classification, il existe un outil dans TerraScan où l'on peut classifier ces points. On prendra comme exemple l'ajout d'une nouvelle classification « Électrique Fil ».

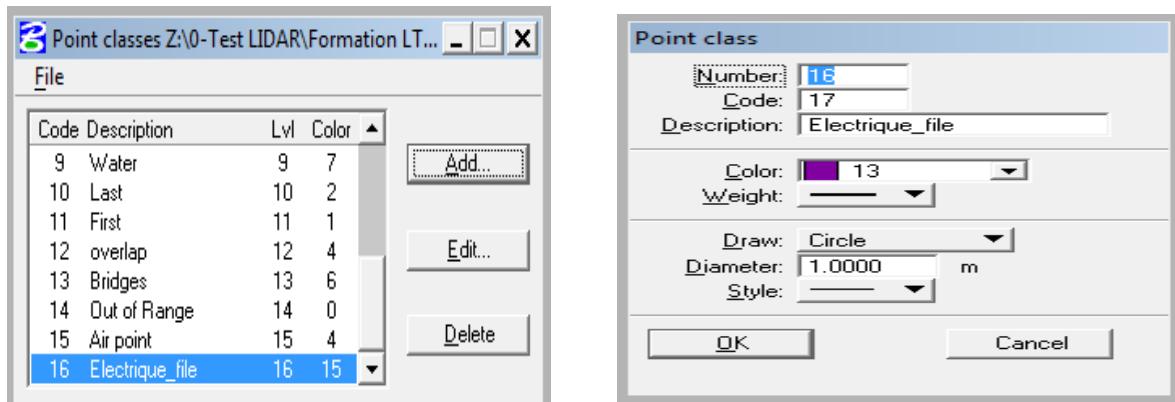


Figure 53 : Crédit d'une classification

La figure x est l'ajout d'une nouvelle classification avec l'onglet « Add ». La figure xx est le paramétrage des caractéristiques du point suivant :

- Son numéro (16) de ligne suivant sa création ;
- So code (17) qui est son identification ;
- Sa couleur (violet 13) pour le distinguer des autres ;
- Son épaisseur (weight) qui est la taille des points ;
- « Draw » et « Diameter » qui sont la taille de saisie lors de la classification.

## 3) Classification des points

A la première prise en main des nuages des points, les détails sont confondus. Par exemple, les points qui devront être au sol sont classés de végétation. Alors, la classification permet de rectifier ces erreurs et de remettre tous les points par défaut, dans sa vraie valeur. La classification des points se passe dans TerraScan. Il existe deux type de classification : la classification Manuelle et la Classification Automatique.

### a) Classification Manuelle

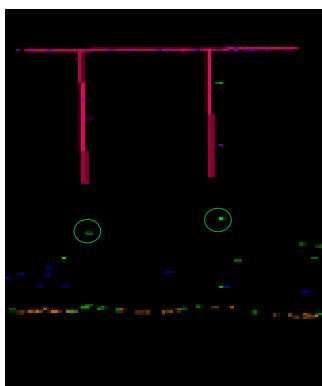
Comme l'indique ce paragraphe, la classification se fait manuellement. Cette classification est une routine dans TerraScan puisqu'on corrige une à une avec les mêmes méthodes, les anomalies de classification des nuages des points. La création de nouvelle classification, la touche de raccourci et la synchronisation des vues prennent effet dans ce type de classification. On prendra comme exemple la classification du fil électrique.

Avant la classification, les fils électriques sont colorés en Vert, ce qui veut dire qu'ils sont classifiés parmi les végétations. Pour commencer, la touche F9 permet de sélectionner dans la zone où l'on veut rectifier le modèle ombré. Un onglet s'affiche pour demander dans quelle vue on aimerait afficher la selection.

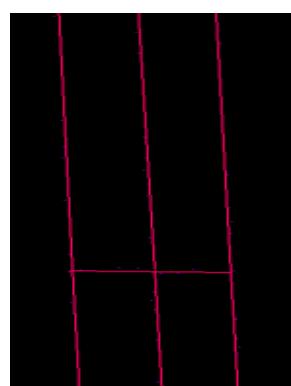


Figure 54 : Affichage de la sélection

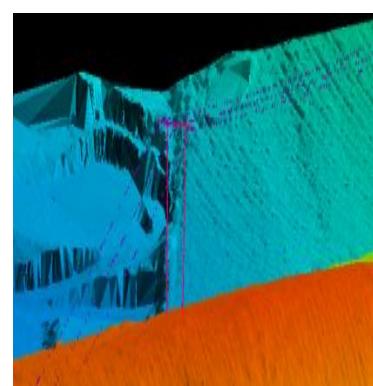
Puis on tape le raccourci du clavier suivant sa personnalisation définie dans la création de la touche de fonction. Un clic gauche, puis on passe le curseur sur les points à changer. Enfin les points sont classifiés suivant sa création.



Vue de profil



vue de dessus



Vue en 3D

Figure 55 : Représentation des vues selon différentes vues

Les points encerclés en vert sont des exemples des points des fils électriques qui sont encore classifiés en végétation. On procède comme suit pour toute autre classification.

### b) Classification Automatique

La classification automatique se fait à partir des « macros ». Ce sont des classifications qui sont élaborées par des logiciels de programmation. Ces macros sont importés dans TerraScan puis ils rectifient automatiquement les anomalies dans le modèle ombré. Ceci permet de réduire le travail effectué par la classification manuelle.

```
nettoyage points en l'air.mac - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
[Terrascan macro]
Description=
Author=
ByLine=0
ByScanner=0
SlaveCanRun=1
AnotherComputerCanRun=1
CanBeDistributed=1

FnScanClassifyHgtGrd(2,100.0,999,1,250.000,2000.000,0)
FnScanDeleteClass(1,0)
FnScanClassifyHgtGrd(2,50.0,7,4,-0.200,50.000,0)
FnScanDeleteClass(7,0)
```

Figure 56 : Exemple de type de Macro « Nettoyage des points en l'air »

### III Modélisation des bâtiments

Après une démonstration de classification des points LiDAR, on va développer la modélisation 3D à partir des points LiDAR. On va prendre comme exemple, la modélisation des bâtiments. Dans cette étude, la modélisation est basée sur une méthode de modélisation automatique d'un bâtiment dans TerraModeler. Pour arriver jusqu'au résultat final, plusieurs étapes seront nécessaires:

- Classification des bâtiments ;
- Création des MNS : elle se calcule dans TerraScan : calcul de surface entre la classification Ground et Bâtiments ;
- Vectorisation du contour des bâtiments (numérisation plaquage) ;
- Application dans TerraModeler.

#### 1) Classification des bâtiments

Avant toute étape, il est nécessaire de faire un filtrage minutieux sur les bâtiments. Si les bâtiments sont bien classifiés, on aura un bon résultat. Le filtrage des bâtiments se fait à partir des toits de la maison. Parmi les points du toit, il peut y avoir des points classifiés. Ces points devront être remis en classe « buildings ». Il faut donc vérifier un par un chaque bâtiment. La méthode utilisée pour le filtrage est comme celle définie précédemment.

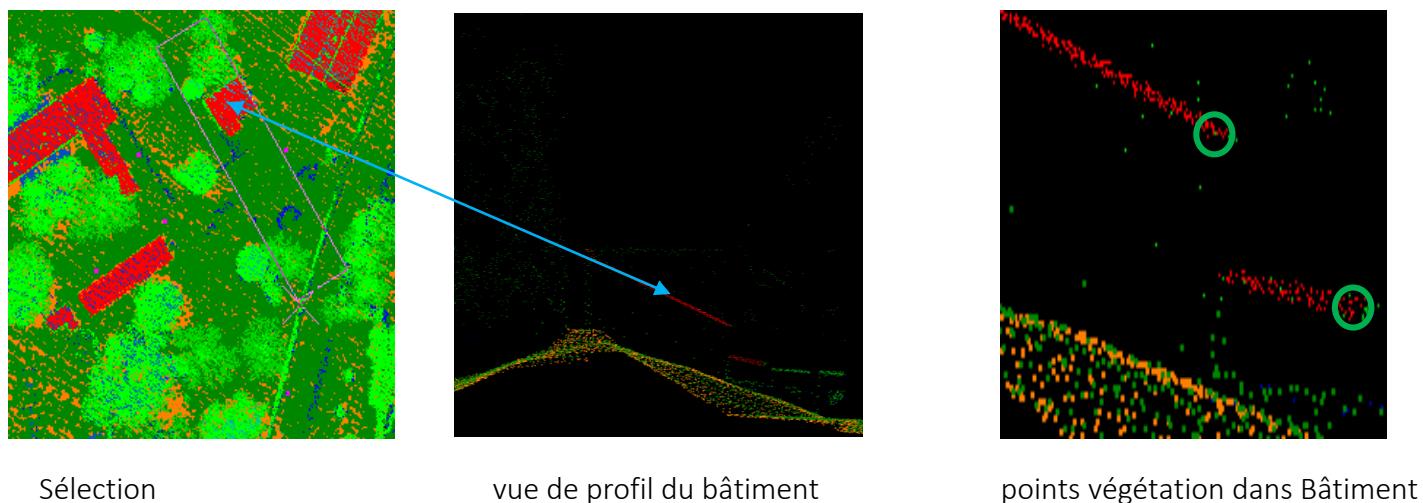


Figure 57 : Figure de sélection du bâtiment

#### 2) Crédit du modèle Numérique de Surface

Pour la création du MNS, il faut mettre en valeur les points du sol et ceux des bâtiments. Ceci permet de bien distinguer la hauteur du bâtiment à partir du sol. Pour ce faire, on procède comme la même méthode dans le paragraphe de création du MNT mais il faut changer les paramètres.

Pour une bonne visualisation, il faut désactiver les autres points et ne laisser que la classification du sol et celle du bâtiment.

### 3) Vectorisation des bâtiments

Après l'étape de la classification et celle de la création de surface, on obtient un modèle facile à vectoriser. La vectorisation du bâtiment se fait automatiquement dans TerraModeler. Il existe un paramètre dans TerraModeler qui sert à extruder les bâtiments automatiquement. Ce paramètre permet aussi de tracer les toitures suivant leur angle de pente à partir des nuages de points. C'est pour cela qu'il faut bien filtrer les classes « building » afin d'éviter des erreurs. C'est l'avantage des données LiDAR par rapport à celui de la photogrammétrie numérique.

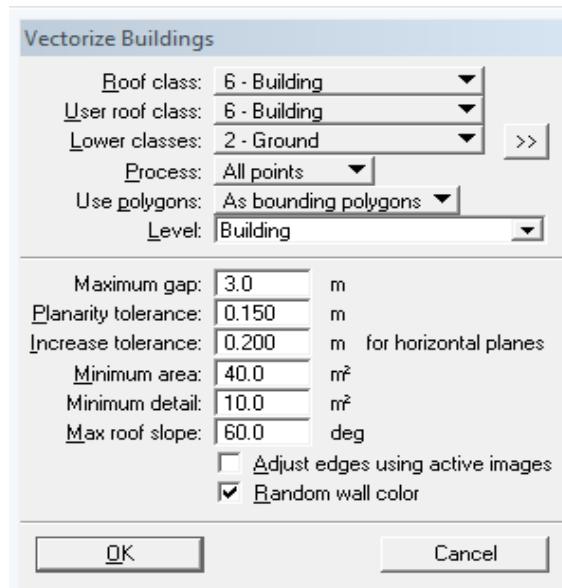


Figure 58 : Paramètre de vectorisation des bâtiments

Roof class : la classe « buildings » est définie comme classe du toit

User roof class : « User classe roof » est la classe intermédiaire entre le toit et le sol.

Lower classes : est la classe au sol, donc la classe « ground »

Process : All points puisqu'on s'intéresse à tous les points du bâtiment

Use polygons: « As bounding polygons »

Level : « building »

Après validation, le toit ainsi que les façades des bâtiments sont tracés automatiquement.

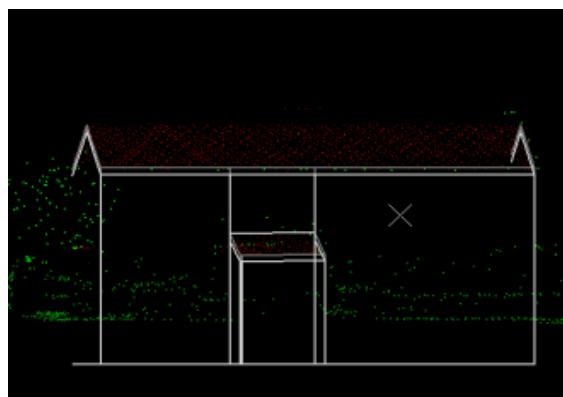


Figure 59 : Résultat de la vectorisation du bâtiment

Des fois, il peut survenir des erreurs au cours de ce traçage automatique. Ces erreurs peuvent être corrigées par d'autres logiciels de modélisation 3D. Ainsi, on peut exporter ce modèle comme un modèle 3D que l'on peut utiliser dans d'autres logiciels de DAO. La modélisation 3D est plus ou moins automatique mais une intervention manuelle est nécessaire afin d'obtenir le modèle 3D final.

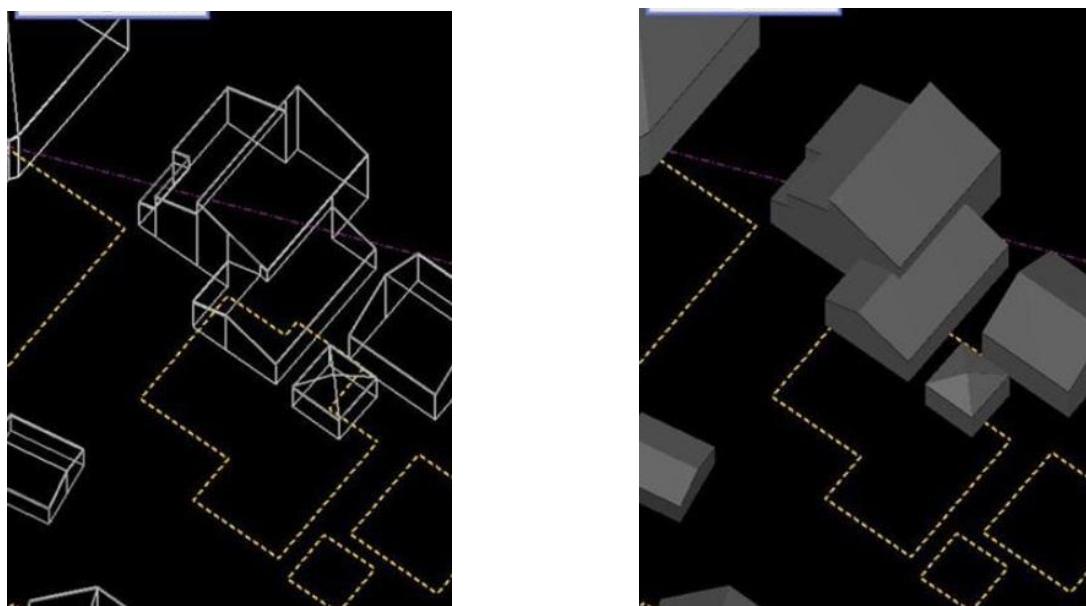


Figure 60 : Type de produit de bâtiment 3D reconstruit par des nuages de points

## RESUME

Comparant à la méthode de restitution photogrammétrique qui nécessite des matériels spécifiés, le LiDAR offre une facilité des tâches sur le traitement des données. Une fois que les nuages de points bruts sont acquis, la suite du travail se fait dans des logiciels spécifiés. Par contre, dans la photogrammétrie numérique, les photos devront être traitées en plusieurs étapes complexes à l'utilisateur.

## CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE

On évoquera dans ce chapitre une étude comparative entre les deux méthodes. La photogrammétrie numérique et le LiDAR sont deux systèmes topographiques d'acquisition de données aériennes. Ils sont tous les deux des systèmes révolutionnaires qui, dans le futur, seront un atout irrévocable dans le domaine topographique.

### I Comparaison sur la précision

#### 1) *Précision des données sur trajectographie*

Comme nous avons vu auparavant, la trajectographie de l'avion dans un système LiDAR est acquise par un système hybride de positionnement INS/GPS dont nous avons évoqué quelques précisions. Le rendu géométrique d'un chantier photogrammétrique est basé sur le calcul d'une trajectographie acquise à partir de données GPS différentielles uniquement. La précision globale après aérotriangulation est de l'ordre de centimètre. Les points de liaisons sont inférieurs à 1/3 de pixel. Par contre, la précision de la géométrie dépend des qualités des points d'appuis sur terrain ainsi que la visibilité de ces points dans les images.

#### 2) *Générations des points*

Dans un cadre photogrammétrique, les points 3D sont générés par couplage de deux photos. Ils gardent la géométrie d'une image à la résolution des images source. Dans l'autre technique, on obtient des points 3D directs mais il y a des problèmes de géométrie. Les nuages des points ne permettent pas d'avoir une géométrie directe par rapport au format image de la photogrammétrie numérique. Si bien que les données brutes sont généralement rééchantillonnées pour former une Modèle Numérique de Surface [Bretar 2006].

#### 3) *Identification image*

L'image aérienne fournit pour une même mesure, des informations dans plusieurs bandes spectrales et permet une interprétation immédiate des paysages survolés. En revanche, les informations reçues par un système Laser ne sont pas directement sûres pour identifier les objets tels qu'ils sont. Si l'acquisition des données LiDAR comprend la mesure des valeurs d'intensité, alors il est possible de générer une image d'intensité. Cette représentation ressemble à des images aériennes monochromes (en noir et blanc) à l'exception faite que celles-ci n'ont pas été acquises dans le même domaine de longueur d'onde. Ces images intensités ne fournissent pas exactement une image précise par rapport à celle issue de la photogrammétrie numérique.



Image par Photogrammétrie Numérique



Image intensité par LiDAR

Figure 61 : Comparaison entre image du Photographie aérienne et du LiDAR

## II Tableau de synthèse des deux méthodes

	Photogrammétrie numérique	LiDAR
Nature des produits	Photographies (argentiques ou numériques)	Nuage de points
Type de capteur	Passif	Actif
Domaine spectral	Visible - PIR	IR
Géoréférencement direct	Facultatif	Obligatoire
Condition météo	Jour et ensoleillé	Nuit et Jour
Volume des données	> 1Go	> 300 Mo
Information 3D	Indirect	Direct
Hauteur de vol	> de 1 000	< 5 000 m
Coûts	800 000ar/km <sup>2</sup>	1 200 000ar/km <sup>2</sup>

Tableau 7 : Comparaison entre photogrammétrie numérique et LiDAR

## RESUME

Du point de vue du coût du projet, l'acquisition des données en photogrammétrie numérique est moins chère que celle du LiDAR. Par contre, il faut bien étudier ce choix surtout sur la qualité des détails pour une bonne gestion du cadastre 3D.

---

# CONCLUSION

---

La pertinence de la mise en place du cadastre en 3D a été démontrée lors du développement de ce rapport. Cependant, trop peu de restrictions ont été modélisées en 3D dans le prototype pour avoir une réponse complète et définitive sur les possibilités offertes par la gestion en 3D de ce type de cadastre. De plus, l'approche de nouveaux domaines de représentation, en l'occurrence la 3D, reste tributaire du développement technologique de tous les outils informatiques. Il apparaît un certain retard dans les SIG suite aux constats que nous avons faits lors de l'analyse spatiale 3D. Par ailleurs, aucune structure topologique n'a encore été bien définie dans le but de poser des règles de contrôle et de qualité applicables à l'organisation des différentes couches inscrites dans ce type de cadastre. Le même problème se pose pour la sémiologie 3D qui est encore en phase d'étude et qui fait l'objet de nombreux débats.

Dans le cas actuel, il faut être conscient que tout le domaine d'application numérique se tend peu à peu vers le besoin en 3D. Le domaine du foncier en fait partie intégrant de cela surtout sur les propriétés verticales. Il serait alors mieux de se tendre peu à peu vers cette troisième dimension qui offre une toute nouvelle orientation dans l'avenir du foncier et celui du Géomètre Expert.

# BIBLIOGRAPHIE

## Articles, revues et ouvrages

[Abbas 2014] Abbas Boubehrezh : Usages et pertinence d'une représentation volumique (3D) cadastrale dans un contexte de gestion municipale québécoise

[Berru 2012] Thibaud Berru : Rédaction d'un guide de recommandations à l'attention des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour caractériser les travaux topographiques par méthodes aériennes tels que la photogrammétrie, la lasergrammétrie et la thermographie.

[Bretar 2006] Frédéric Bretar : Couplage de Données Laser Aéroporté et Photogrammétiques pour l'Analyse de Scènes Tridimensionnelles.

[Chandelier 2011] Chandelier L. : La prise de vue photogrammétrique. ENSG, Département Imagerie Aérienne et Spatiale.

[Cord 1998] Matthieu Cord : Analyse d'images aériennes hautes résolution : Détection et Modélisation du bâti en zone Urbaine

[Gervaix 2010] F. Gervaix : Éléments de photogrammétrie, Cours de photo-interprétation

Jantein Stoter [Stoter 2004] 3D Cadastre

[Kalantri 2009] Mahzad Kalantri : Approche directe de l'estimation automatique de l'orientation 3D d'images

[Mada 01] Madagascar Code foncier

[Wolf/Dewitt 2000] Wolf, P.R. & Dewitt, B.A.: Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd ed. Edition McGraw-Hill Companies, New-York. ISBN 978-0-0729-2454-1, 608 p.



Fédération International des Géomètres [FIG 1995] FIG Statement on the Cadastre, *Commission 7*. Retrieved

[http://www.fig.net/commission7/reports/cadastre/statement\\_on\\_cadastre.html](http://www.fig.net/commission7/reports/cadastre/statement_on_cadastre.html)

Wikipedia@ [Wiki 2013], Définition photogrammétrie

<http://fr.wikipedia.org>

Wikipedia@ [Wiki 2013], Définition LiDAR

<http://fr.wikipedia.org>

ClarkVisio [Clark 2008], URL

<http://www.clarkvision.com/articles/film.vs.digital.summary1/index.html>

# Glossaire

**Centrale inertielle** : cf. INS

**GPS** : Global Positioning System – Système de positionnement et de navigation par satellite.

**Grille ou Grid MNT** : MNT sous forme d'un quadrillage, issu d'une interpolation du semis de points du MNT ; il s'agit de données de type raster (images).

**INS** : Inertial Navigation System – ou centrale inertielle – Dispositif muni de gyroscopes, d'accéléromètres et d'un calculateur, permettant à l'aéronef de connaître sa position et sa vitesse dans l'espace.

**MNE** : Modèle Numérique d'Elévation – Dans le cadre du projet de la Loire Moyenne, modèle numérique incluant les données du sol issues du premier écho, les bâtis, les ponts et viaducs.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain - Représentation numérique des altitudes d'une surface. Il correspond à une grille régulière de points, localisés par leurs coordonnées géographiques (longitudes et latitudes, X et Y), dont les altitudes (mesures altimétriques, Z) ont été interpolées au départ de points cotés. Mathématiquement, est représenté par la formule :

$$z = f(x, y)$$

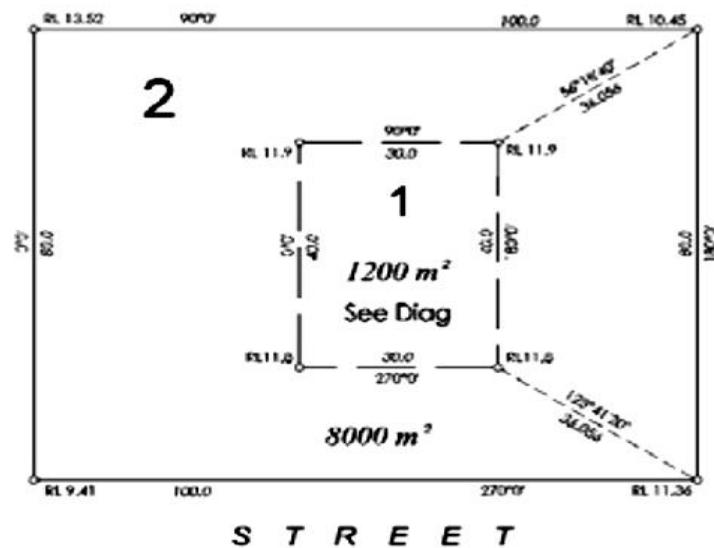
**Temps GPS** : Echelle de temps continu basée sur le temps universel coordonné (Coordinated Universal Time, UTC) dont l'origine est le 6 Janvier

# A NNEXE

## ANNEXE 1 : PLAN CADASTRAL DE COPROPRIETE DANS LE MONDE

### CAS D'AUSTRALIE

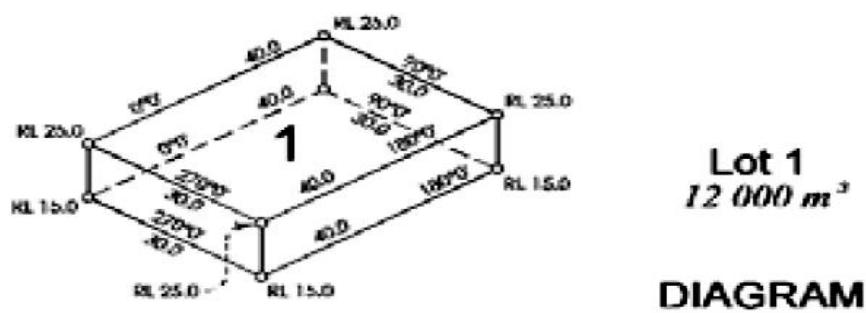
*Parcelle Volumique*



Datum for AHD: PSM 123 - RL 8.465

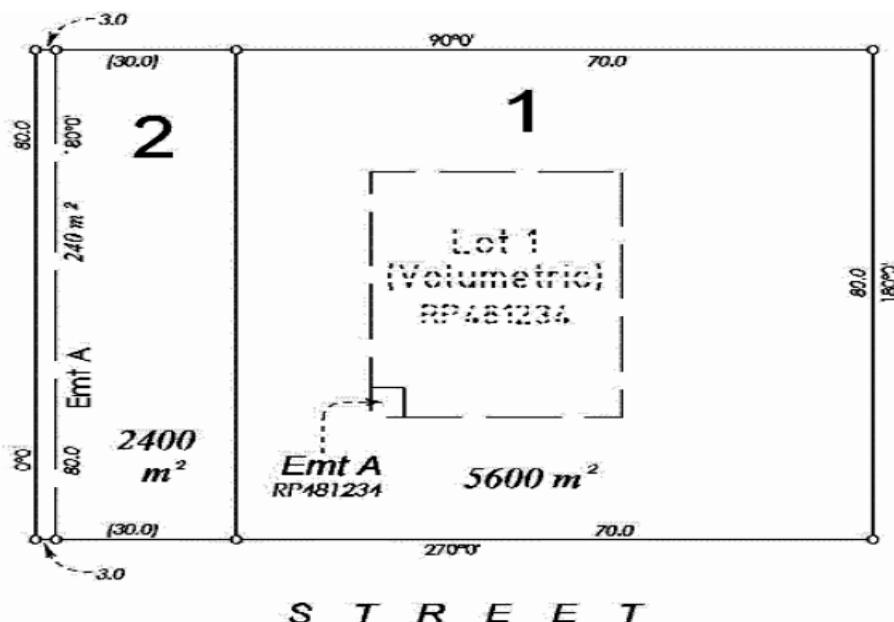
*Plan of Lots 1 and 2  
cancelling Lot 10 on RP123456*

Empreinte du lot volumique 1 sur le plan standard

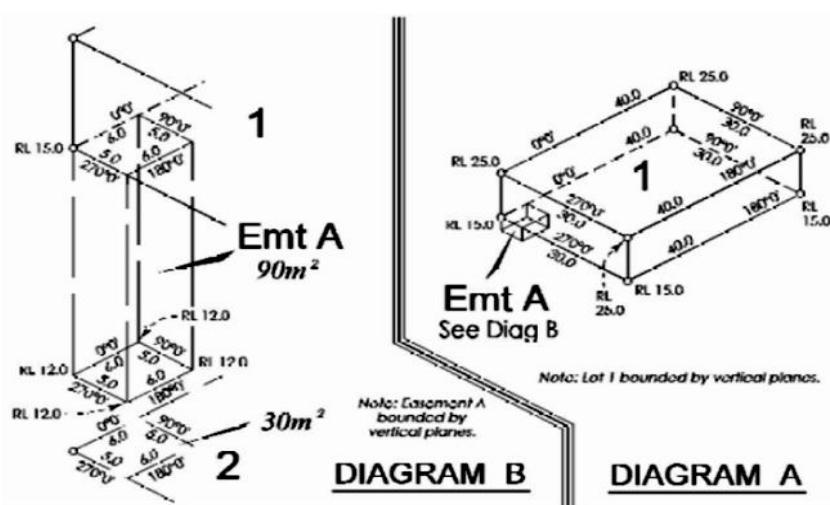


représentation du lot volumique 1 sur le plan volumique

### *Parcelle restantes*

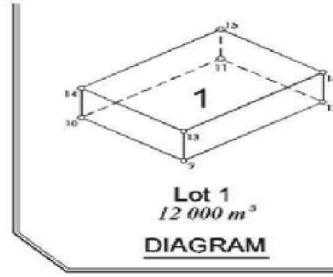


Représentation du lot restant 2 sur le plan standard

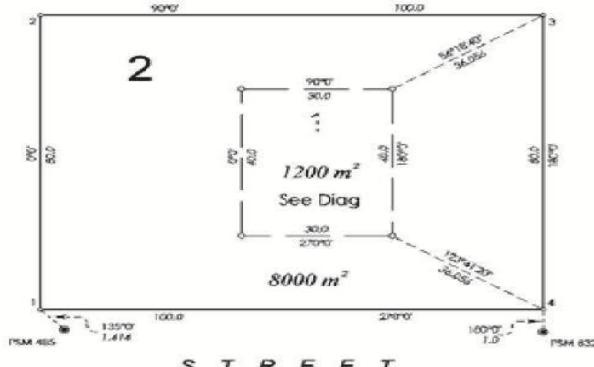


Représentation d'une parcelle restreinte (Emt A) sur le plan volumique

STN	EASTING	NORTHING	REL
1	300,000	100,000	9,470
2	300,000	100,000	12,820
3	300,000	100,000	16,170
4	200,000	100,000	11,280
5	140,000	120,000	18,180
6	170,000	120,000	18,200
7	170,000	160,000	18,900
8	140,000	160,000	18,900
9	170,000	120,000	15,000
10	140,000	120,000	15,000
11	140,000	120,000	15,000
12	170,000	140,000	15,000
13	170,000	120,000	25,000
14	140,000	120,000	25,000
15	140,000	160,000	25,000
16	170,000	160,000	25,000
F54AB65	101,000	99,000	9,120
F54AS02	200,000	99,000	12,000

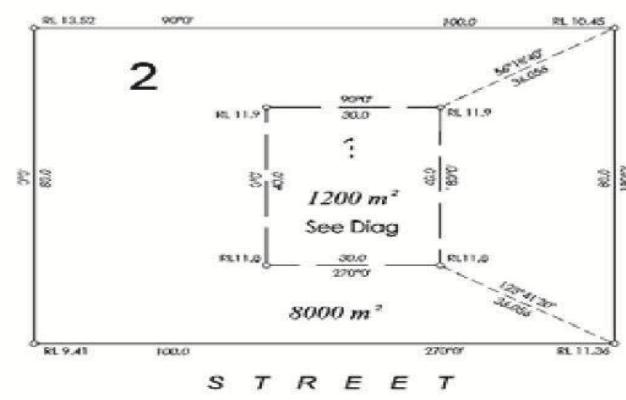
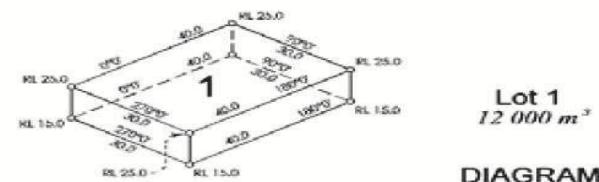


Motor left & bounded by vertical planes



Datum for AHD: PSM 123 - RL 8.465  
Co-Ordinate System: Plane, Origin Str 1 100,000 E., 100,000 N

Plan de parcelles volumétrique avec des coordonnées



Datum for AHD: PSM 123 - RL 8.465

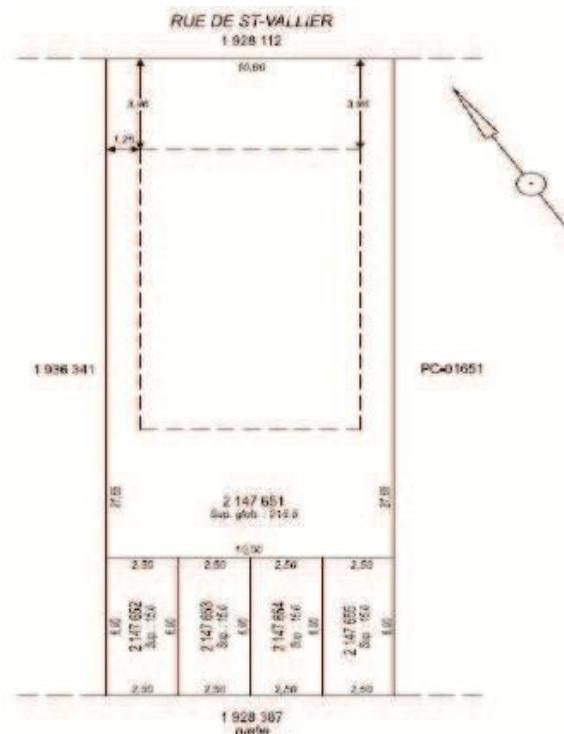
*Plan of Lots 1 and 2  
cancelling Lot 10 on RP123456*

## Plan de parcelle volumétrique avec cotes

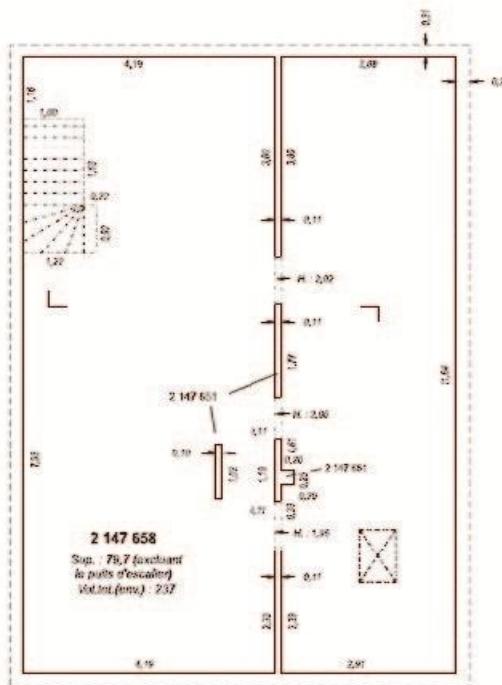
## CAS DU CADASTRE QUEBECOIS



## Plan cadastral parcellaire



## Vue de localisation



Plan d'un étage

## ANNEXE 2 : Bilan de l'inventaire de la FIG sur le cadastre 3D réalisé en 2010

En novembre 2010, la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) a effectué une enquête sur le cadastre 3D à travers le monde. Au total, 37 pays/provinces ont répondu au questionnaire : Allemagne, Angleterre, Argentine, Australie (Queensland et Victoria), Autriche, Bahreïn, Brésil, Canada (Québec), Chine, Chypre, Corée du Sud, Croatie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Inde, Indonésie, Israël, Italie, Kazakhstan, Kenya, Macédoine, Malaisie, Népal, Nigeria (Delta State), Norvège, Pays-Bas, Pologne, Russie, Suède, Suisse, Trinité et Tobago, Turquie.

**Annexe 2 – Tableau n°1 : Concept de la parcelle 3D au cadastre dans le monde**

	<b>Est-il permis d'avoir des parcelles 3D qui ne sont pas liées à des constructions ou des objets physiques? (ex. l'espace aérien, les volumes de sous-sol)</b>	<b>Y a-t-il une législation générale (loi et/ou règlements) pour une description 3D des parcelles?</b>
<b>Allemagne</b>	Oui	Non
<b>Angleterre</b>	Oui	Non
<b>Argentine</b>	Non	Non
<b>Australie</b>	Oui	Oui
<b>Autriche</b>	Non	Non
<b>Bahreïn</b>	-	-
<b>Brésil</b>	Non	Non
<b>Canada</b>	Oui	Non
<b>Chine</b>	Oui	Non
<b>Chypre</b>	-	Non
<b>Corée du Sud</b>	Oui	Non
<b>Croatie</b>	Non	Non
<b>Danemark</b>	Non	Non
<b>Espagne</b>	Oui	Non
<b>Finlande</b>	Non	Non
<b>France</b>	Non	Non
<b>Grèce</b>	Non	Non
<b>Hongrie</b>	Non	Non
<b>Inde</b>	Non	Non
<b>Indonésie</b>	Oui	Non
<b>Israël</b>	Oui	Non
<b>Italie</b>	Non	Non
<b>Kazakhstan</b>	Oui	Non
<b>Kenya</b>	Oui	-
<b>Macédoine</b>	Non	Non
<b>Malaisie</b>	Oui	Non
<b>Népal</b>	-	Non
<b>Nigeria</b>	Non	Non
<b>Norvège</b>	Oui	Non
<b>Pays-Bas</b>	Non	Non
<b>Pologne</b>	-	Non
<b>Russie</b>	Non	Non
<b>Suède</b>	Non	Non
<b>Suisse</b>	-	Non
<b>Trinité et Tobago</b>	Non	Non
<b>Turquie</b>	Non	Non

**Annexe 2 – Tableau 2 : Définition des limites des unités d'appartements dans le monde**

<b>Les limites des unités d'appartements sont définies par les murs, les plafonds et les planchers?</b>	
Allemagne	Oui
Angleterre	Non
Argentine	Oui
Australie	Oui
Autriche	Oui
Bahreïn	-
Brésil	-
Canada	Oui
Chine	-
Chypre	Non
Corée du Sud	Non
Croatie	Oui
Danemark	Oui
Espagne	Oui
Finlande	Non
France	Oui
Grèce	-
Hongrie	Oui
Inde	Oui
Indonésie	Oui
Israël	Non
Italie	Oui
Kazakhstan	Oui
Kenya	Oui
Macédoine	Oui
Malaisie	Non
Népal	Oui
Nigeria	Non
Norvège	Oui
Pays-Bas	Non
Pologne	Non
Russie	Oui
Suède	Oui
Suisse	-
Trinité et Tobago	Non
Turquie	Non

**Annexe 2- Tableau 3: Enregistrement des unités de bâtiments en 3D au cadastre dans le monde**

	Est-il permis d'avoir des parcelles 3D qui ne sont pas liées à des constructions ou des objets physiques? (ex. l'espace aérien, les volumes de sous-sol)	Y a-t-il une législation générique (loi et/ou règlements) pour une description 3D des parcelles?
Allemagne	Oui	Oui
Angleterre	Oui	Oui
Argentine	Oui	Oui
Australie	Oui	Oui
Autriche	Oui	Non
Bahreïn	Non	-
Brésil	Non	Oui
Canada	Oui	Oui
Chine	Oui	Non
Chypre	Oui	Oui
Corée du Sud	Oui	-
Croatie	Oui	Oui
Danemark	Oui	Oui
Espagne	Oui	Oui
Finlande	Non	-
France	Oui	Oui
Grèce	Non	Non
Hongrie	Oui	Non
Inde	Oui	Oui
Indonésie	Oui	Oui
Israël	Oui	Oui
Italie	Oui	Oui
Kazakhstan	Oui	Oui
Kenya	Oui	Oui
Macédoine	Oui	Non
Malaisie	Non	Oui
Népal	Non	Oui
Nigeria	Oui	Oui
Norvège	Oui	Oui
Pays-Bas	Oui	Oui
Pologne	Non	Oui
Russie	Oui	Oui
Suède	Oui	Oui
Suisse	Oui	Oui
Trinité et Tobago	Oui	Oui
Turquie	Oui	Non

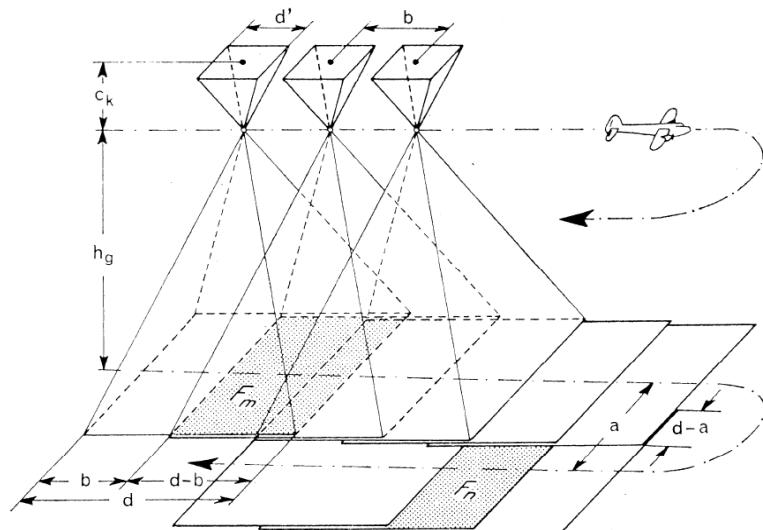
## Annexe 2- Tableau 4: Les applications et les usages désirés du cadastre 3D dans le monde

Les applications/usages désirés du cadastre 3D?	
<b>Allemagne</b>	-
<b>Angleterre</b>	Enregistrement
<b>Argentine</b>	-
<b>Australie</b>	Assurer la définition unique des droits de propriété; Servir les marchés de propriété complexes; Le modèle 3D de la ville; La prévention et la détection des empiètements
<b>Autriche</b>	Avoir les informations sur les services publics (tunnels ferroviaires, lignes d'alimentation)
<b>Bahreïn</b>	-
<b>Brésil</b>	-
<b>Canada</b>	La validation des PC; La représentation des cas plus complexes de la superposition des propriétés; Avoir une vue complète de la géométrie des propriétés; Améliorer les systèmes de taxation; Effectuer les analyses spatiales 3D
<b>Chine</b>	-
<b>Cypre</b>	-
<b>Corée du Sud</b>	-
<b>Croatie</b>	Comme le cadastre 2D; Évaluation foncière; Modélisation 3D
<b>Danemark</b>	-
<b>Espagne</b>	Surtout pour le marché immobilier
<b>Finlande</b>	-
<b>France</b>	Enregistrement et gestion des droits superposés
<b>Grèce</b>	RRR en 3D
<b>Hongrie</b>	La définition des parcelles 3D; Aménagement foncier; Aménagement du territoire
<b>Inde</b>	Bâtiments; Les services; Les infrastructures; Taxation
<b>Indonésie</b>	La représentation 3D des unités d'appartements
<b>Israël</b>	Assurer une définition unique des droits de propriété; Servir les marchés immobiliers complexes: Améliorer la volonté et inspirer la confiance des investisseurs à investir dans le développement 3D.
<b>Italie</b>	Définir la propriété et les usages communs clairement
<b>Kazakhstan</b>	-
<b>Kenya</b>	Le modèle 3D de la ville
<b>Macédoine</b>	-
<b>Malaisie</b>	Assurer la possession et les droits de propriété
<b>Népal</b>	Assurer des droits fonciers et un usage polyvalent du cadastre
<b>Nigeria</b>	Aménagement de territoire
<b>Norvège</b>	-
<b>Pays-Bas</b>	-
<b>Pologne</b>	-
<b>Russie</b>	La modélisation 3D dans le domaine du développement urbain; Enregistrement des services publics souterrains; Enregistrement des carrefours à niveaux multiples; À des fins fiscales
<b>Suède</b>	-
<b>Suisse</b>	-
<b>Trinité et Tobago</b>	Droits marins: canalisation souterraine et autres réseaux; Les modèles de bâtiments complexes
<b>Turquie</b>	Le Modèle 3D de la ville; Expropriation d'une partie seulement du volume en dessous de la surface.

## ANNEXE 3 : PHOTOGRAFMETRIE NUMERIQUE

### PLAN DE VOL

Figure présentant les éléments qui interviennent dans le calcul de plan de vol



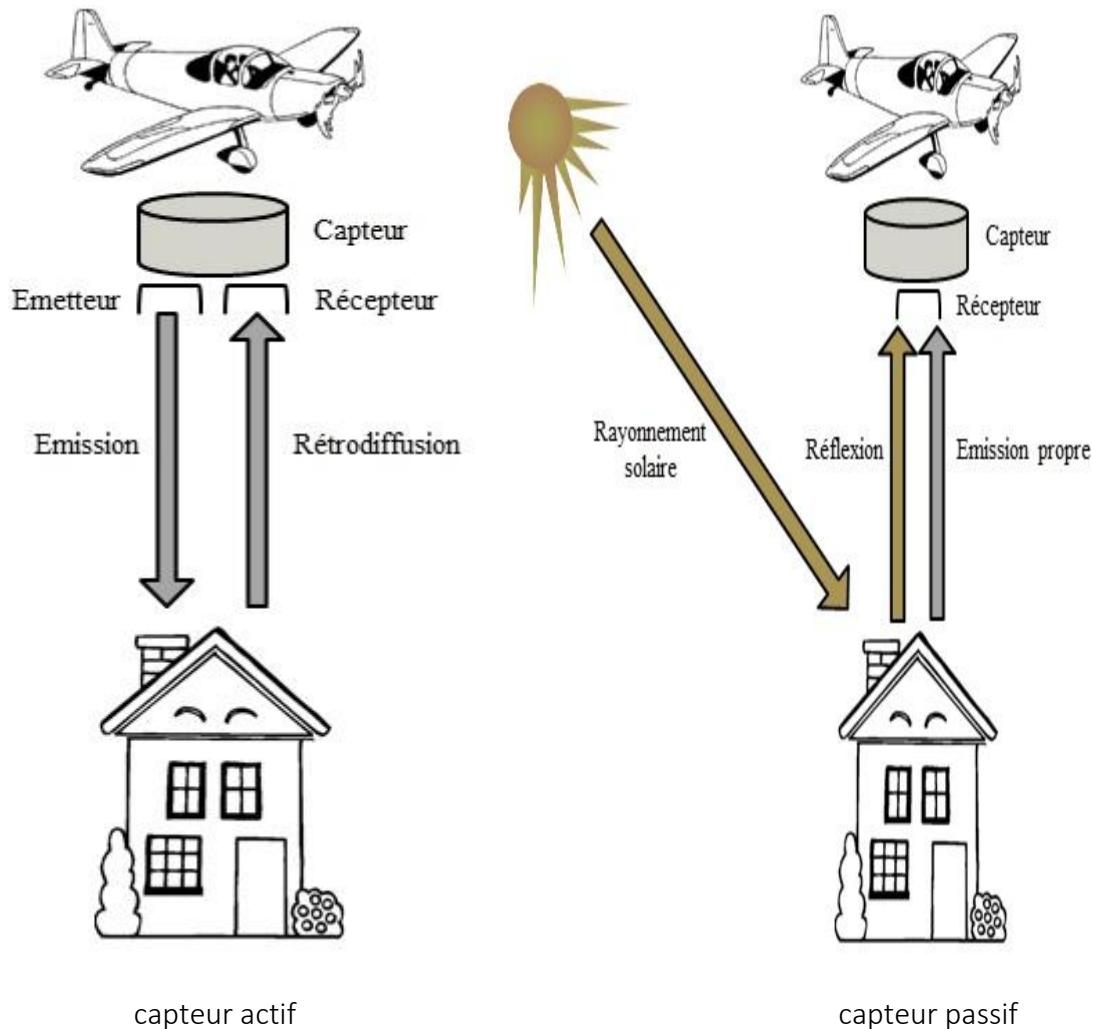
Eléments qui interviennent dans le calcul du plan de vol

Tableau 1 : Différents paramètres de calcul de plan de vol

Hauteur du vol	$h_g = c_k \cdot m_b = \frac{s}{s'} \cdot c_k$
Distance sur terrain	$s = s' \cdot m_b = \frac{h_g}{c_k} \cdot s'$
Aire représenté par une image	$F_g = d^2 = d'^2 \cdot m_b^2$
Longueur de base avec recouvrement longitudinal de p%	$b = d \left(1 - \frac{p}{100}\right)$
Distance entre bande pour un recouvrement latéral de q %	$a = d \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
Rapport entre base et altitude	$\Theta = \frac{b}{h_g}$
Nombre de photographies par une bande	$n_p = \frac{l_p}{b} + 1$
Nombre de bandes	$n_q = \frac{l_q - d}{a} + 1$
Surface couverte par le modèle	$F_m = (d - b) \cdot d$
Nouvelle surface stéréoscopique	$F_n = a \cdot b = d^2 \left(1 - \frac{p}{100}\right) \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
Nombre nécessaire de clichés	$n \approx \frac{F_a}{F_n} \quad *F_a = 100 \text{ km}^2 \quad **F_a = 100 \text{ sq. m.}$
Intervalle d'exposition	$\Delta t = \frac{b}{v_g} = \frac{d' \cdot m_b}{v_g} \left(1 - \frac{p}{100}\right)$

### CAPTEURS PHOTOGAMMETRIQUE

*Figure de différence entre capteur passif et actif*



Type de caméra



Caméra analogique (Leica RC30)



caméra numérique (ADS 40)

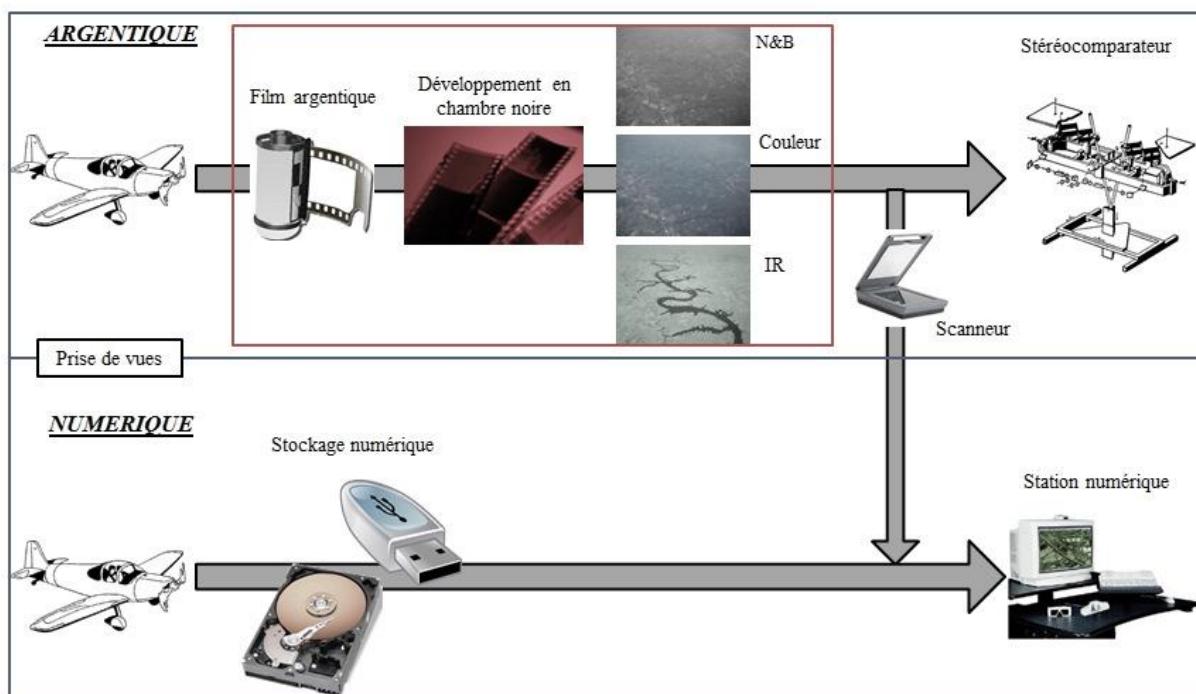
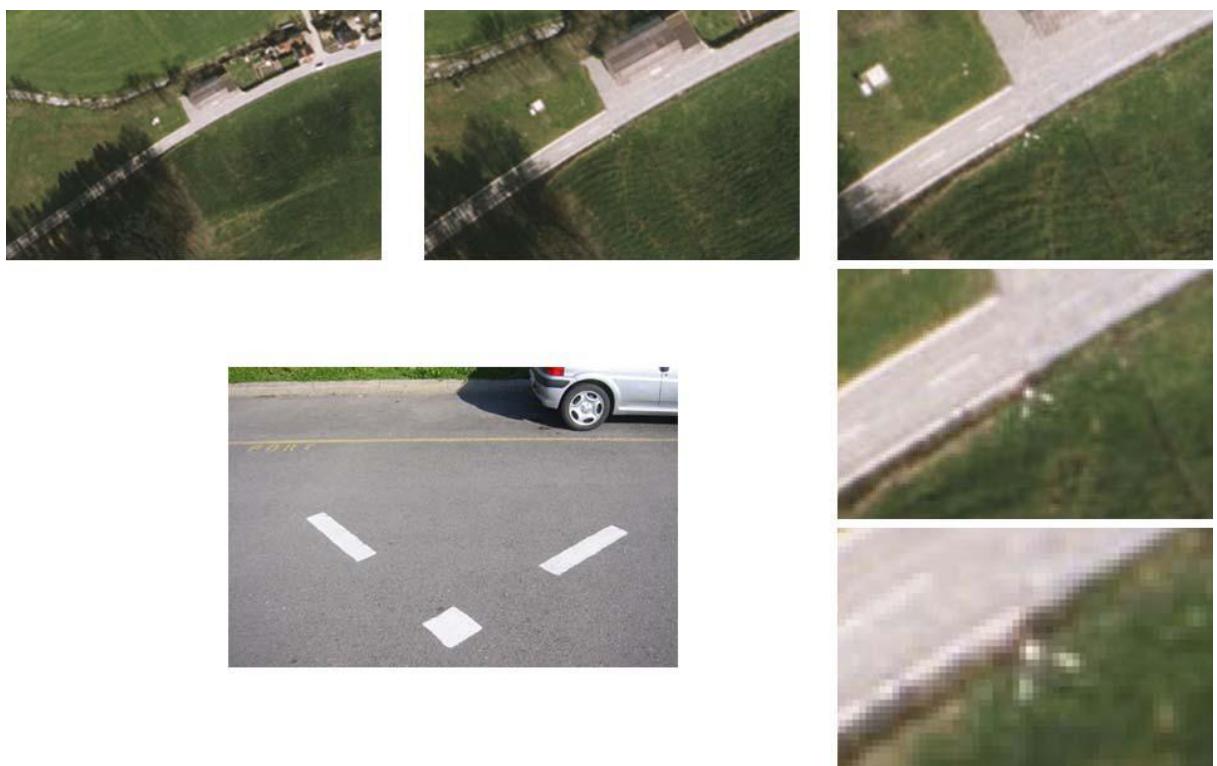


Schéma comparatif de l'acquisition de photographies aériennes par méthodes argentiques et numériques

### PROCESSUS PHOTOGRAMMETRIQUE

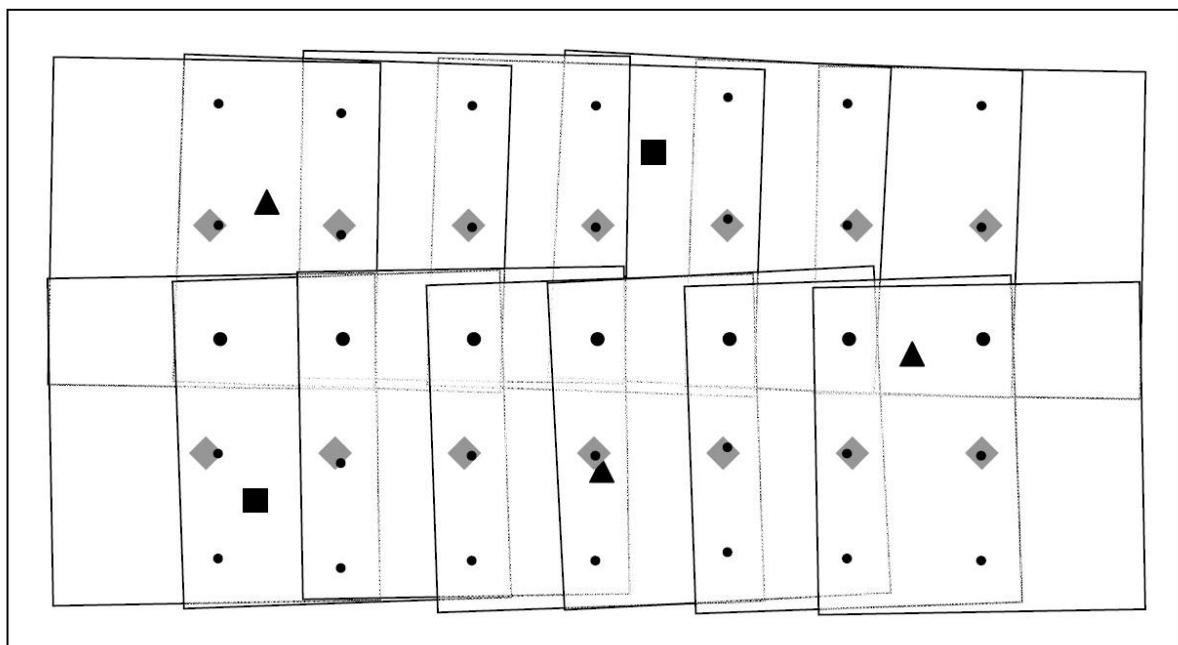
#### STEREOPREPARATION

*Illustration du point de calage peint au sol*

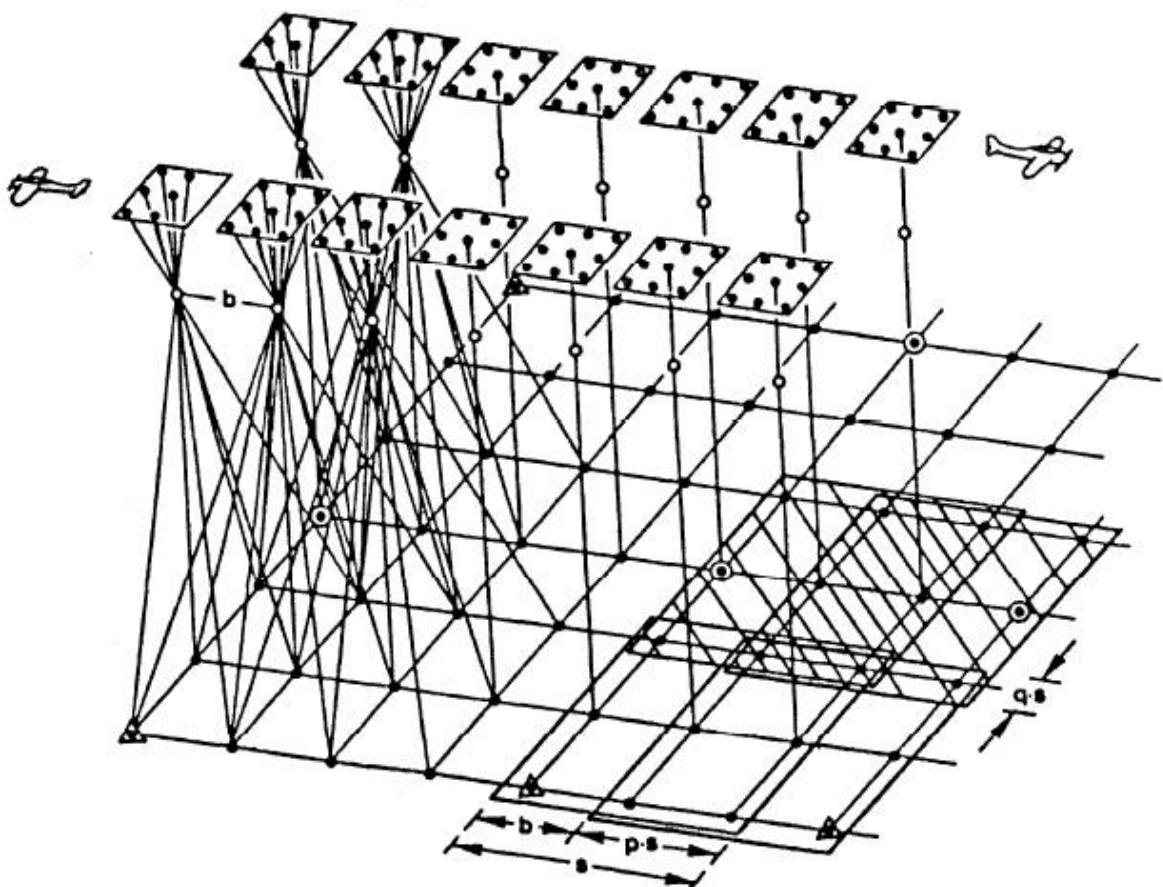


## AEROTIANGULATION

*Représentation schématique des éléments essentiels d'un bloc d'aérotriangulation*

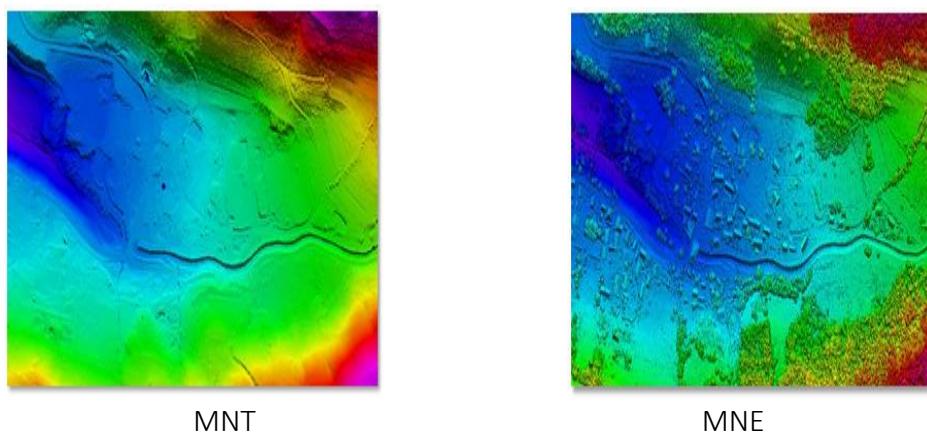


*Autre perspective de représentation*



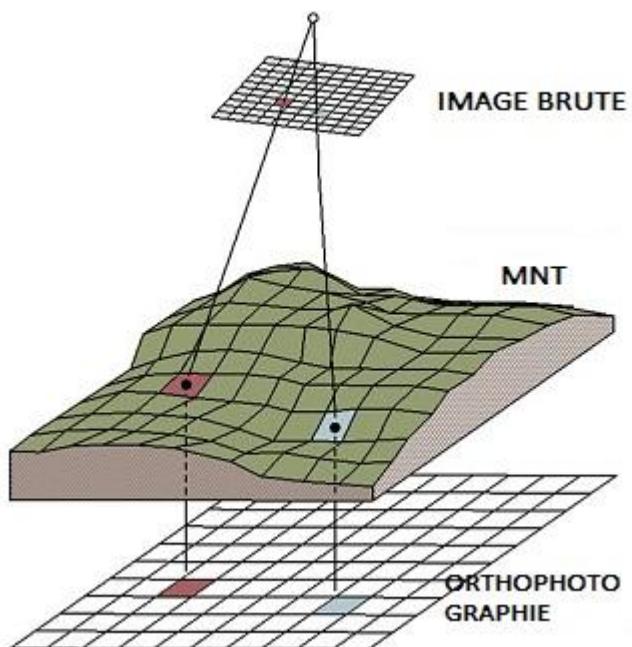
## **MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN**

## *Représentation du MNT et MNE*



## ORTHORECTIFICATION

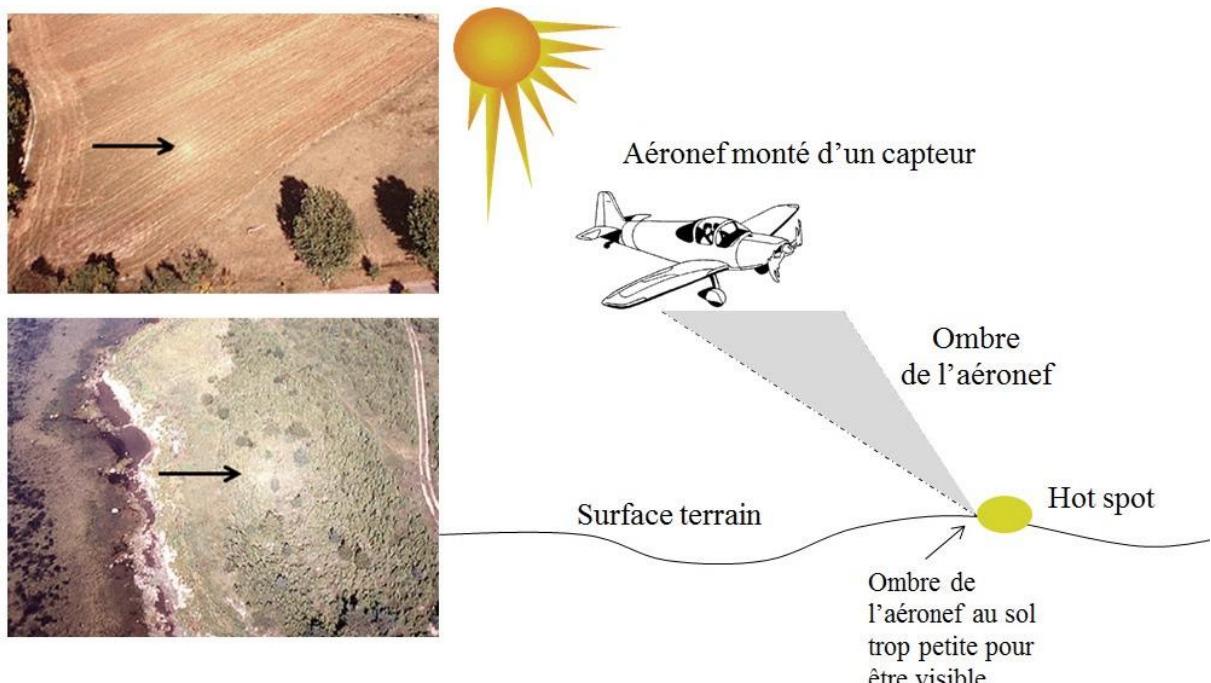
*Figure sur le principe de création de l'Orthophotogrammétrie*



### *Figure de représentation de la correction colométrique*

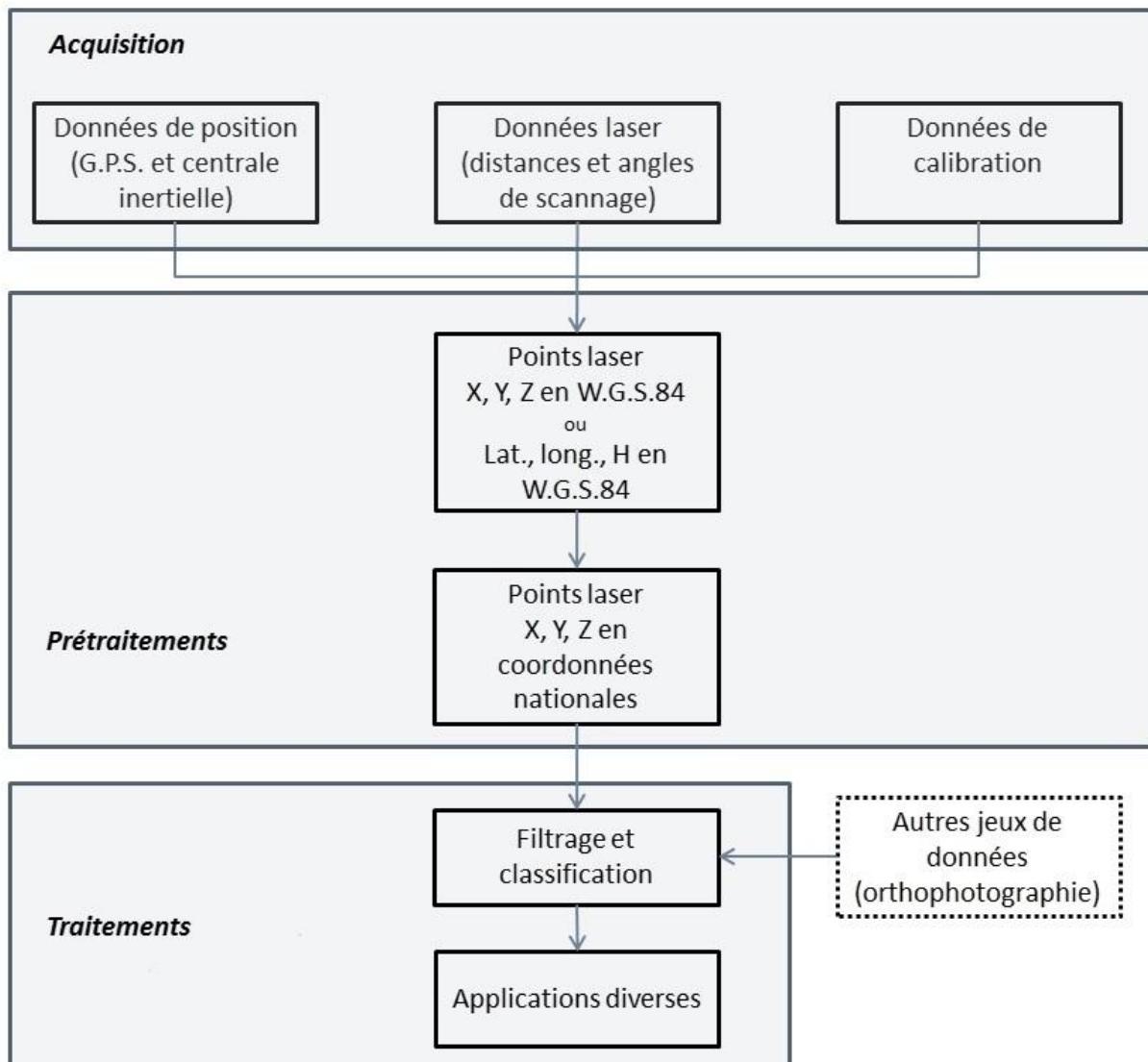


*Phénomène de l'hotspot*



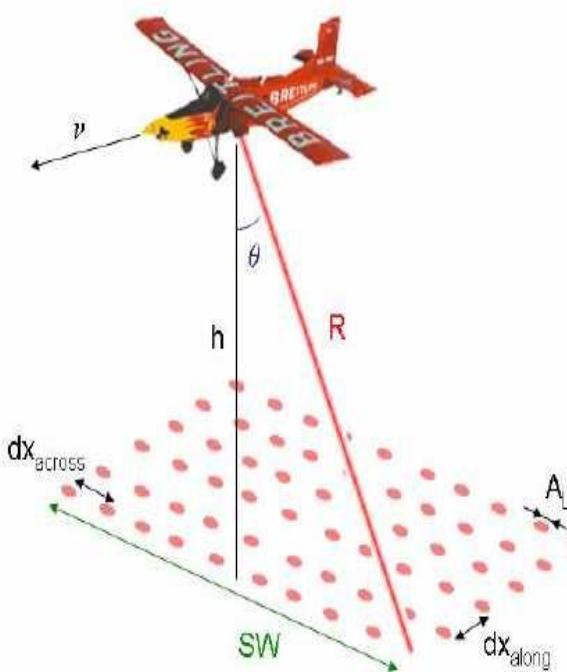
Exemple de phénomène « hotspot

## ANNEXE 4 : LiDAR



Etapes de traitement des données brutes en LiDAR

### Quelques formules...



$T_L$  = Temps de parcours du faisceau

$\gamma$  = divergence du faisceau laser (mrad)

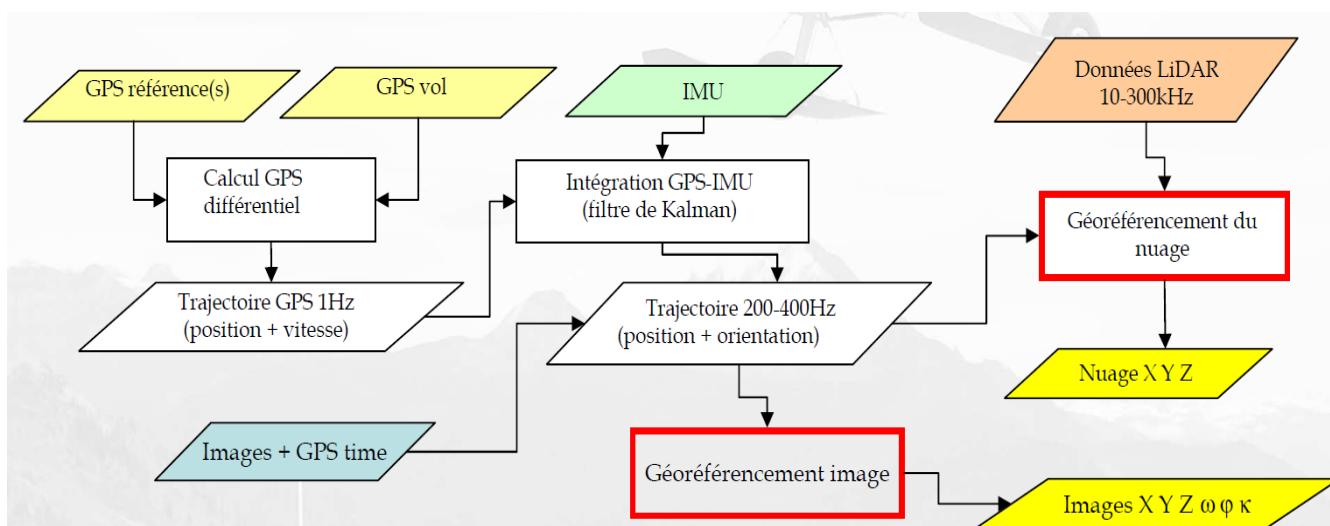
$F$  = PRF = Fréquence de répétition des impulsions (kHz)

$f_{sc}$  = Nombre de lignes scannées / sec (Hz)

$v$  = vitesse de l'avion (m/s)

Paramètre	Symbol	Formule
Range	R	$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_L$
Diamètre de l'emprunte au sol	$A_L$	$A_L = \left( D + 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right) = h \cdot \gamma$
Largeur d'un bande	SW	$SW = \left( 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) = a \cdot h$
Espace des points parallèlement à la ligne de vol	$dx_{along}$	$dx_{along} = (v \cdot T_L)$
Espace des points perpendiculairement à la ligne de vol	$dx_{across}$	$dx_{across} = \left( \frac{h}{\cos^2(\theta_{int})} \cdot \frac{\theta_{int}}{PRF} \right) = \frac{SW}{N}$
Nombre de points par ligne scannée	N	$N = \frac{F}{f_{sc}}$
Surface couverte pour une ligne de vol	A	$A = SW \cdot v \cdot T_L$
Densité de points par unité de surface	d	$d = \frac{F \cdot n \cdot T_L}{A}$

### Quelque formule en LiDAR



### Géoréférencement des nuages de points LiDAR

# T

## ABLE DES MATIERES

### PARTIE I : GENERALITES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE CADASTRE 3D .....	3
I. Introduction .....	3
II. Principe du cadastre 3D .....	3
1) Cadastre avec des étiquettes 3D .....	4
2) Cadastre hybride.....	4
a) L'enregistrement des droits volumiques.....	4
b) Enregistrement des objets physiques.....	5
3) CADASTRE ENTIEREMENT 3D .....	5
a) Combinaison 2D/3D du cadastre.....	6
b) Cadastre purement 3D.....	7
III Cadastre 3D dans le Monde.....	6
1) Cas d'Australie (Queensland) .....	6
a) Parcille standard.....	7
b) Parcille du batiment.....	7
c) Parcille restreinte.....	7
d) Parcille volumique.....	7
e) Parcille restante.....	7
2) Cas de l'Espagne.....	9
3) Cas du Cadastre québécois .....	10
4) Cas de Pays-Bas .....	12
5) Synthèse des quatre systèmes cadastraux examinés .....	13
CHAPITRE II Généralités sur l'immatriculation des appartements à Madagascar .....	14
I Démembrement.....	14

1) Définition.....	14
2) Système de Démembrement .....	14
3) Travail en démembrement.....	15
a) Travail sur terrain.....	16
b) Travail au bureau.....	16
II Les parties prenantes.....	16
1) Société de construction .....	16
2) Copropriétaires des immeubles .....	16
a) Propriété commune.....	17
b) Choix du syndicat.....	17
c) Cas de destruction.....	18
b) Autres cas.....	18

## PARTIE II : PHOTOGRAMMETRIE

CHAPITRE I PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE.....	19
I Notion générale .....	19
1) Définition.....	19
2) Principe général.....	19
3) Processus de traitement en photogrammétrie .....	21
II Spécifications des levés photogrammétrique.....	22
1) Prise de vue .....	22
a) Echelle.....	23
b) Dévers.....	24
c) Etude du rapport base sur hauteur.....	24
2) Choix de la focale .....	24
a) Notion générale sur la focale.....	25
b) Type de caméra.....	28
c) Exemple de caméra numérique.....	28
3) Résolution spatiale .....	28
a) Notion de résolution spatiale.....	29

b) Résolution proposée en milieu urbain.....	29
4) Synthèse générale .....	28
III Modélisation 3D en Photogrammétrie .....	29
1) Situation actuelle.....	29
2) Obtention des images numériques .....	29
3) Photographie aérienne des zones urbaines .....	30
a) Classification bâti-sol-végétation.....	31
b) Vectorisation du bâti.....	32
IV Restitution photogrammétrique .....	32
1) Définition.....	32
2) Matériel de restitution .....	32
3) Méthode de Restitution .....	33
CHAPITRE II LIDAR .....	35
I Généralités sur Lidar .....	35
1) Définition.....	35
2) Principe général.....	35
3) Principe géométrique.....	36
4) Principe d'écho multiple .....	37
II Outils et matériels.....	38
1) Matériel utilisé .....	38
a) Scanner Laser.....	39
b) GPS et INS.....	40
b.1 GPS.....	40
b.1 INS.....	41
b.3 Combinaison GPS/INS.....	41
c) Type de plateforme.....	43
d) Hauteur de vol.....	43
2) Plan de vol.....	42

III Contrôle de précision LiDAR.....	42
1) Détection des échos.....	43
2) Densité des points.....	43
3) Système de référencement.....	43
IV Spécification pour le système cadastre 3D.....	44
1) Mode Multi-écho .....	44
2) Paramètre de vol.....	45
a) Type de plateforme.....	45
b) Hauteur de vol.....	46
3) Système de référencement.....	46

### PARTIE III : CONCEPTION DU CADASTRE 3D

CHAPITRE I PRESENTATION DES DONNEES .....	48
I Traitement des données brutes.....	48
1) Etape de traitement.....	48
2) Logiciel de traitement .....	49
3) Format des images.....	50
II Analyse des données .....	51
1) Donnée de la Restitution photogrammétrique.....	51
2) MNT de l'agglomération d'Antananarivo .....	52
3) Dossier de Démembrement.....	53
4) Choix de la zone .....	53
CHAPITRE II CONCEPTION DU PROTOTYPE CADASTRE 3D (CAS DE LA COPROPRIETE).....	55
I Prise en main des données .....	55
1) Gestion des calques dans AUTOCAD/COVADIS .....	55
2) Traitement par étage .....	57
II Gestion des bâtiments .....	59
1) Présentation des bâtis sur TERRA EXPLORER.....	59
2) Gestion proposée.....	59
a) Annotations des parcelles.....	43
b) Intégration des données.....	43

III Autres possibilités offertes.....	62
1) Modélisation du Sous-sols .....	62
2) Modélisation des scènes urbaines .....	63
3) Modélisation de restrictions publiques .....	66
a) Sur Autocad.....	64
b) Modélisation sur Google Sketchup.....	64
4) Rôle du géomètre expert .....	67
a) Verifucation des mesures.....	68
b) Mise à jour du plan 3D.....	68
c) Dossier des réquerants.....	68
CHAPITRE III PERSPECTIVE LiDAR .....	70
I Traitement des données brutes.....	70
1) Notion de nuage de point.....	70
2) Préparation des données.....	71
3) Contrôle des données.....	71
a) Extraction des nuages de points.....	72
4) Méthodologie de traitement .....	73
II Phase de Prétraitement .....	73
1) Logiciel .....	73
2) Chargement du bloc.....	74
a) Chargement des points.....	75
b) Chargement des fonctions.....	75
III Filtrage des points.....	76
1) Création du Modèle Numérique du Terrain .....	76
2) Création d'une classification .....	78
3) Classification des points.....	78
a) Classification Manuelle.....	75
b) Classification automatique.....	75
VI Modélisation des bâtiments.....	80
1) Classification des bâtiments .....	80
2) Création du modèle Numérique de Surface .....	80

3) Vectorisation des bâtiments .....	81
CHAPITRE IV ÉTUDE COMPARATIVE .....	83
I Comparaison sur la précision.....	83
1) Précision des données sur trajectographie.....	83
2) Générations des points .....	83
3) Identification image .....	83
II Tableau de synthèse des deux méthodes.....	85
BIBLIOGRAPHIE.....	87
WEBOGRAPHIE .....	88
ANNEXE .....	90
TABLE DES MATIERES.....	110

Auteur : RAKOTOMANANJO Ziona Andrianina  
IAH 5 TER AVARATSENA ITAOSY  
Téléphone : 033 02 048 61  
E-mail : [zionaandrianinarakotomananjo@yahoo.fr](mailto:zionaandrianinarakotomananjo@yahoo.fr)

Titre de mémoire :

ELABORATION DU CADASTRE 3D PAR PHOTOGGRAMMETRIE NUMERIQUE

Nombre de pages : 113

Nombre de figures : 61

Nombre de tableaux : 07

#### RESUME

Dans le contexte actuel de densification des villes, des situations de plus en plus complexes de superpositions des propriétés apparaissent. Pour mieux comprendre, et ainsi mieux gérer ces situations, l'utilisation d'un cadastre 3D et de représentation 3D sont requises. Actuellement, bien que la recherche avance sur la question des cadastres 3D, il n'existe pas encore de guide général pour la création de telle représentation. Chaque pays réalise leur propre prototype qu'il s'avère être le mieux pour l'administration. Pour Madagascar, on peut se référer sur le prototype créé et l'améliorer au fur et à mesure du temps. Ce travail propose donc dans un premier temps de voir des expériences dans le monde pour l'enregistrement des plans verticaux, puis dans un second temps de voir la méthode utilisée pour l'acquisition des données et pour finir, une perspective de proposition sur une représentation tridimensionnelle des propriétés superposées.

Mots clés : Cadastre, représentation, Trois Dimension

#### ABSTRACT

In the current context of densification of the cities, more and more complex situations of superpositions of properties appear. In order to better understand and better manage these situations, the use of a 3D cadastre and 3D representations is required. However, although looking ahead on the issue of 3D cadaster, does not yet exist guidelines for creation of such visualizations. Currently, although research continues on the issue of 3D cadastre, there is still no general guide to creating such a representation. Each country makes its own prototype that proves to be the best for the administration. For Madagascar, reference can be created on the prototype and to improve as time. So this work proposes at first to see experiences in the world to record vertical planes, then in a second time to see the method used for data acquisition and finally a perspective proposal on representation superposed dimensional properties.

Keywords: Cadastre, representation, three-dimensional

Encadreurs : Monsieur RAJAONARISON Jean Désiré

Monsieur RAZAFINDRAKOTOHARY Tiana Richard