

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	v
LISTE DES ANNEXES	vi
LISTE DE CARTE ET DES FIGURES	vi
LISTE DES ORGANIGRAMMES	vi
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES UNITES	viii
INTRODUCTION	1
I. Présentation de la zone objet de l'étude [1]	2
CHAPITRE I. REALISATION D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE PAR STATION TOTAL	8
I. Généralités	8
II. Travaux préliminaires.....	10
III. Description des opérations sur terrain	16
IV. Traitement des données	24
V. Organigramme de processus	32
CHAPITRE II : ETABLISSEMENT D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE A L'AIDE D'UN DRONE	33
I. Généralités	33
II. Historique et caractéristiques d'un drone	34
III. Processus de production d'un plan topographique ou d'une image à partir d'un drone	48
IV. Les différentes catégories d'images	66
V. Analyse du coût et délai de la création du plan / images	69
VI. Organigramme de processus	74
CHAPITRE III. COMPARAISON DES DEUX METHODES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	75
I. Comparaisons.....	75
II. Interprétation.....	82
III. Perspectives de recherche	83
IV. Recommandations	88
CONCLUSION	89
ANNEXES.....	A
I. Historique et politique globale de Holcim Madagascar	B

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

BD	: Base de Données
CD	: Cercle Droit
CG	: Cercle Gauche
CAD	: Chargeur Automatique de Documents
D	: Distance
2D	: Deux Dimensions
DAO	: Dessin Assisté par Ordinateur
e	: échelle
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FTM	: Foibe-Taosarintanin'i Madagasikara
GPS	: Global Positioning System
GRS80	: Geodesic Reference System 1980
HOLCIM	: Holderbank Ciment
HD	: High Definition (Haute Définition)
Hz	: Angle Horizontal
IGAT	: Information Géographique et Aménagement du Territoire
MNE	: Modèle Numérique d'Élévation
MNS	: Modèle Numérique de Surface
MNT	: Modèle Numérique du Terrain
PC	: Personal Computer
PVA	: Prise de Vue Aérienne
QSE	: Qualité Sécurité Environnement
RN	: Route Nationale
SIG	: Système d'Information Géographique
TN	: Terrain Naturel
3D	: Trois Dimensions
UAV	: Unmanned Aircraft System (Véhicule Aérien sans pilote)
V	: Angle Vertical
WGS84	: World Geodesic System 1984

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Présentation de HOLCIM Madagascar	B
Annexe 2 : Détermination planimétrique des points	e
Annexe 3: LES SCENARIOS OPERATIONNELS.....	h
Annexe 4: PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME GPS	i
Annexe 5: Table de projection Laborde	m
Annexe 6 : Tableau récapitulatif des comparaisons des deux méthodes d'acquisitions	o
Annexe 7: Coordonnées des points à implanter.....	r

LISTE DE CARTE ET DES FIGURES

Carte : Carte de localisation de la commune rurale d'Alatsinainy Ibity

Figure 1: Variation annuelle de la température d'Antsirabe (1991-2000).....	4
Figure 2: Variation annuelle de la précipitation de la station d'Antsirabe et nombre de jours de pluies (1991-2000).....	5
Figure 3: Diagramme obrothermique de la station d'Antsirabe (1991-2001) d'après la modèle de Gaussen $P=2T$	6
Figure 4: Variation d'humidité relative de la station d'Antsirabe	6
Figure 5: Méthode différentielle [5]	18
Figure 6: Courbe de temps [4]	19
Figure 7: Illustration des 3 axes.....	39
Figure 8: Morphologie des nuages [14]	52
Figure 9: Illustration des heures de vol [14]	53
Figure 10 : Roulis, tangage et lacet [15].....	56
Figure 11 : Prise de vue photogrammétrique [16].....	57
Figure 12: Canevas d'aérotriangulation [14].....	61
Figure 13: Déformation dans une prise de vue [17]	65
Figure 14: Pyramide de la sécurité du groupe Holcim	C
Figure 15: Les règles cardinales de sécurité du groupe Holcim	D

LISTE DES ORGANIGRAMMES

Organigramme 1: Réalisation d'un plan topographique avec la station total.....	32
Organigramme 2: Processus d'établissement du plan/image	48
Organigramme 3: Déroulement de l'établissement d'un plan à l'aide d'un drone	74
Organigramme 4: Etapes de comparaison.....	75
Organigramme 5: Processus de calcul.....	85

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Massif de KIBOY [1]	2
Photo 2: Les massifs quartzites de l'Ibity [2]	3
Photo 3: Point de station	12
Photo 4: Récepteur GPS (Trimble5800)	12
Photo 5: La station total Leica TCR303	13
Photo 6: DJI Phantom 3 Professional	38
Photo 7: La radiocommande	42
Photo 8 : Modèle Numérique de Surface et Modèle Numérique de Terrain [18]	62
Photo 9 : MNS-carrière [18]	63
Photo 10 : Société Holcim Madagascar d'Antsirabe	C

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des bornes	11
Tableau 2: Types de mesure avec précision	13
Tableau 3: Portée maximale selon le réflecteur	14
Tableau 4: Portée sans réflecteur	15
Tableau 5: Mode de mesure	15
Tableau 6: Portée avec réflecteur	15
Tableau 7: Les coordonnées Laborde des points de rattachement	20
Tableau 8: Moyen personnel et matériel pour la polygonation	20
Tableau 9 : Coordonnées planimétriques	25
Tableau 10 : Coordonnées altimétriques	28
Tableau 11: Domaines d'utilisations de la photographie aérienne	34
Tableau 12: Echelle de la prise de vue	54
Tableau 13: Résolution	60
Tableau 14: Avantages et inconvénients des catégories d'images	67
Tableau 15: Avantages et inconvénients de l'orthophotoplan produite par un drone	68
Tableau 16: Echelle Orthophoto	69
Tableau 17: Prix de l'orthophoto au F.T.M	69
Tableau 18: Exemple de mission d'orthophoto	70
Tableau 19: Temps machines	70
Tableau 20: Temps personnel	70
Tableau 21: Temps sur terrain	71
Tableau 22: Matériels de production	71
Tableau 23: Charges indirectes	71
Tableau 24: Temps machine	72
Tableau 25: Prix du Logiciel Pix4D mapper Pro	72
Tableau 26: Synthèse des comparaisons	76
Tableau 27: Comparaison de la préparation	77
Tableau 28: Comparaison de la reconnaissance	77
Tableau 29: Comparaison entre les matériels utilisés	78
Tableau 30: Comparaison entre les méthodes de mesure	78
Tableau 31: Comparaison du coût et délai	79

Tableau 32: Classification sommaire des cartes et plans	80
Tableau 33: Avantages et inconvénients des travaux effectués par les deux appareils utilisés	82

LISTE DES UNITES

Ar	: Ariary	km /h	: kilomètre par heure
Ar/j	: Ariary par jour	kg	: kilogramme
cm	: centimètre	m	: mètre
°c	: degré Celsius	mAh	: milliAmpère-heure
cgon	: centigon	m²	: mètre carré
Dpi	: Dot per inch	m³	: mètre cube
dmgons	: décimilligons	mgon	: milligon
gon	: gon	mm	: millimètre
GB	: GigaBits	Mhz	: Mégahertz
Gr	: Grade	MP	: MégaPixels
GHz	: Giga Hertz	m /s	: mètre par seconde
km	: kilomètre	PU/h	: Prix Unitaire par heure
km²	: kilomètre carré	μ	: micron

INTRODUCTION

Le levé topographique est l'ensemble des opérations destinées à recueillir sur le terrain les éléments du sol nécessaires à la réalisation d'un plan ou d'une carte.

Aujourd'hui, les méthodes traditionnelles de relevés topographiques peuvent prendre beaucoup de temps, sont laborieuses et dangereuses pour certains endroits face à la technologie avancée.

Ces derniers temps, il n'est pas rare d'entendre parler ou de voir des images de drone. L'utilisation de drone, longtemps réservée au domaine militaire tend à se démocratiser sur le territoire national grâce à l'avènement des systèmes professionnels destinés aux métiers de la mesure. Profitant de la technologie des objets connectés (Smartphones, tablettes, robots, etc.), les coûts de développement des UAV, ont considérablement été réduits ces cinq dernières années, engendrant ainsi l'émergence d'une toute nouvelle filière : les drones civils professionnels. C'est pourquoi des topographes et des géomètres-experts, se sont appropriés de cette nouvelle technologie en l'associant à la photogrammétrie.

Au début des années 2000 déjà, les drones sont utilisés comme un nouveau support, un nouvel outil pour réaliser des relevés photogrammétriques, LIDAR ou encore thermiques. Le système drone, un outil parmi tant d'autres pour faciliter les travaux des géomètres-topographes. S'il reste un jouet pour certains qui n'en connaissent pas l'usage et se demandent comment l'utiliser comme outil topographique fiable et économiquement viable ; jusqu'à quelle échelle les livrables issus de cet aéronef sont valables.

C'est la raison même pour laquelle le présent ouvrage a été conçu. L'étude s'est articulée autour de deux axes : l'acquisition des prises de vues et l'exploitation des données. Ce présent mémoire s'intitulant « **Lever aérien par drone comparé au lever terrestre par station total** » a pour objectif d'en déduire la maîtrise et les intérêts des drones pour les travaux topographiques.

Pour ce faire, la première partie de notre étude se penchera à la réalisation d'un plan topographique par station total, la seconde illustrera l'établissement d'un plan topographique à l'aide d'un drone et la troisième et dernière partie exprimera une étude comparative entre ces deux méthodes ainsi que des perspectives de recherche seront traitées, avant de conclure.

I. Présentation de la zone objet de l'étude [1]

I.1. Situation géographique

Le massif d'Ibity se trouve dans le firaiana d'Alatsinainy Ibity, Fivondronana Antsirabe II et faritany d'Antananarivo, région Vakinankaratra. Il se situe à 25km au Sud d'Antsirabe suivant la RN7 près de HOLCIM et à 9,5 km environ au Sud-Ouest de la plaine de Manandona qu'on peut localiser par les coordonnées suivantes (459344,556 ; 671095,641). Le massif a une longueur maximale d'environ 13,5 km et large de 8 km. Le massif est limité à l'Est par la RN7 et la rivière Manandona. Au Nord, il est limité par la région d'Antsirabe et au Sud également par la rivière Manandona.

Le massif d'Ibity est orienté approximativement Nord- Sud sur les hautes terres centrales malgaches. Il est nettement plus élevé et la plus grande partie s'étend au-dessus de 1900m. L'accessibilité du massif est facilitée par une route secondaire praticable toute l'année. Faisant partie du domaine du centre, le massif abrite de nombreuses richesses en biodiversité.

Le massif d'Ibity est constitué par des affleurements quartzites, avec une pente supérieure ou égale à 60°. Cette forte pente ne permet pas aux pâturages des zébus. En plus, presque tout le bas fond est transformé en riziculture. La zone des pâturages se trouve qu'au bas versant, sur la faible pente de la colline comme la versant Est face à la commune de Manandona et de Sahanivotry Sud.

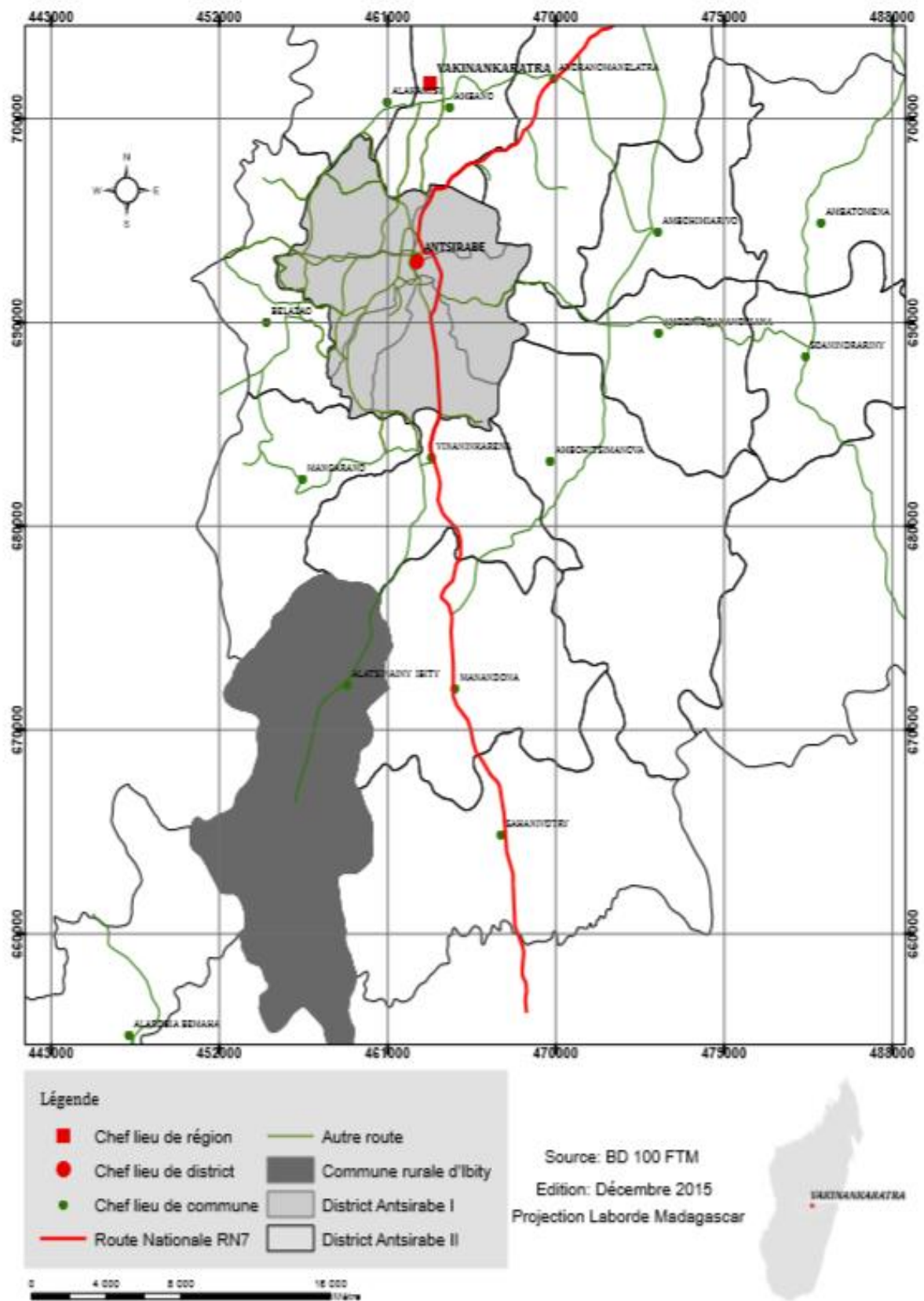
I.2. Reliefs

Le sommet du massif culmine à 2254 m, le massif quartzifère de l'Ibity a une forme ellipsoïdale et on trouve à l'Est du massif les montagnes satellites, plus petites et moins élevées comme KIBOY, VOHIBONGO, AMBOROMPOTSY.

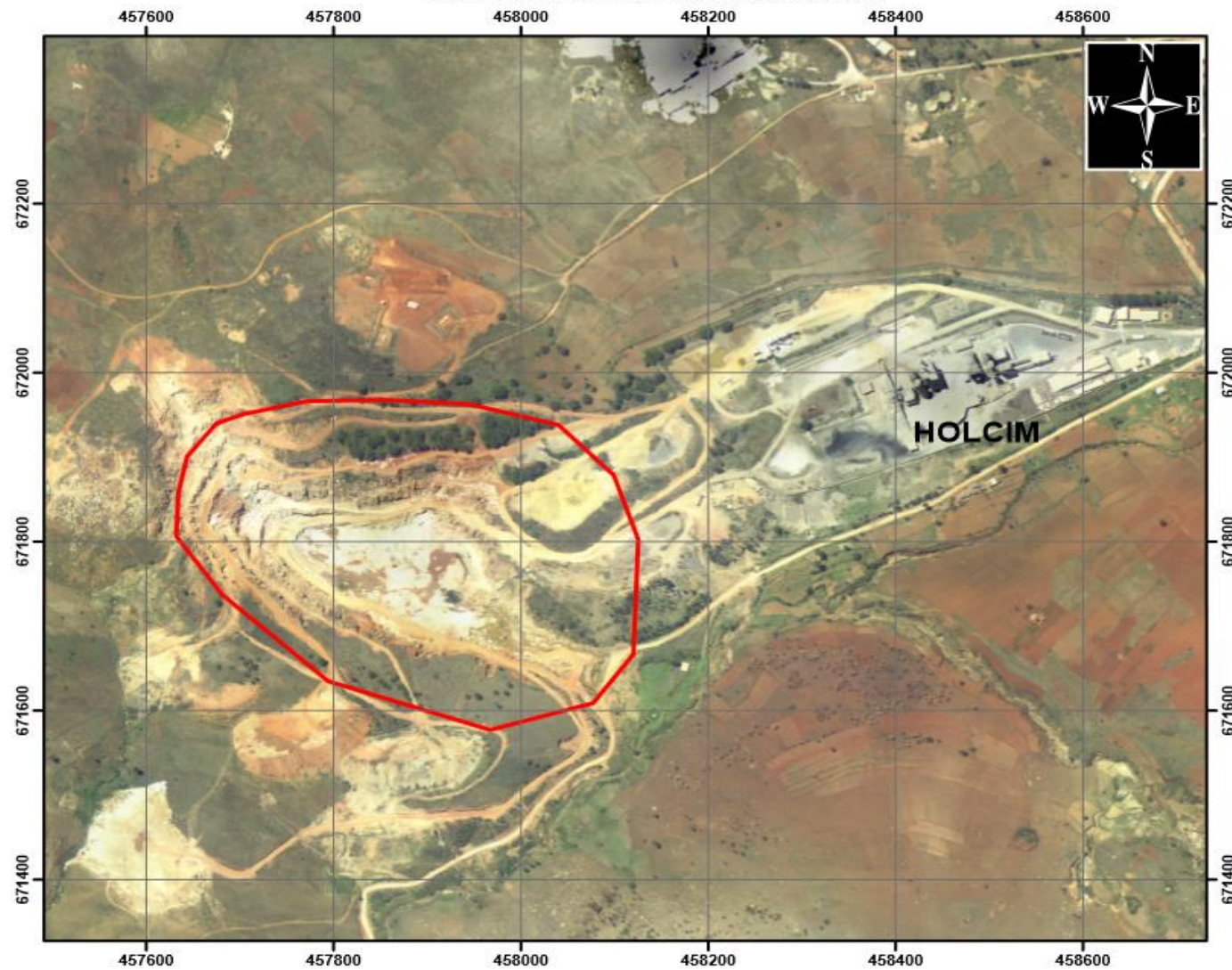
Photo 1: Massif de KIBOY [1]



Carte de localisation de la commune rurale d'Alatsinainy Ibity

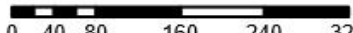


Délimitation de la zone d'étude



Légendes

 *limite zone*

 Mètres
0 40 80 160 240 320

Source: orthophoto ANTIRABE I et II
Projection: Laborde Madagascar

I.3. Géologie et Géomorphologie [1]

Le sommet du massif de l'Ibity est l'affleurement rocheux quartzitique le plus élevé de Madagascar. Le socle est formé par de schiste quartzitique. L'affleurement de granite est inférieur à 5%, des cipolins se trouvent à l'Ouest et au Sud, à l'Est on a une bande de micaschiste et des roches migmatitiques. Le massif est allongé et couvre une surface de 45 km².

La région de l'Ibity se trouve à une vingtaine de kilomètres au Sud d'Antsirabe. Elle est facilement accessible par la route de l'Ibity qui s'embranche sur la route du Sud à Vinaninkarena. Son intérêt géologique résulte de la présence d'un ensemble particulier dit Complexe schisto-quartzo-calcaire(ou marbre) et schisto-quartzo-dolomitique dont l'âge et la stratigraphie ne sont pas nettement établis.

En nous référant aux données actuelles, ce complexe comprend à la base, des micaschistes ou des schistes dans lesquels se développent irrégulièrement et avec un développement variable, des bancs de cipolins et de quartzites et, au sommet, une puissante série quartzitique constituant le sommet de l'Ibity. Du marché de l'Ibity, une autre route automobilisable part vers le Sud - Ouest, passant devant la carrière de cipolin de l'Ibity et par une descente recoupant les micaschistes et tangentant les quartzites, arrive au village d'Ihasy où on retrouve les cipolins dolomitiques. Au milieu des micaschistes, on remarquera quelques lits décimétriques de talc.

Photo 2: Les massifs quartzites de l'Ibity [2]



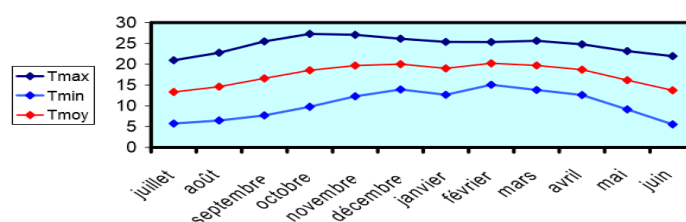
I.4. Climat

Les données climatiques ont été obtenues auprès du service Météorologique d'Ampandrianomby. Ces données ont été recueillies durant les années 1991 – 2000, elles concernent la station d'Antsirabe car la commune rurale d'Ibity ne possède pas de station météorologique. Ces données sont valables pour Ibity, vu que les deux communes sont proches l'une de l'autre.

I.4.1. Température

Comme la majeure partie des hautes terres la saison se divise en 2 parties bien distinctes : la saison chaude et humide et la saison fraîche et sèche.

Figure 1: Variation annuelle de la température d'Antsirabe (1991-2000)



Source : Service Météorologique d'Ampandrianomby

La saison chaude et humide s'étale d'octobre jusqu'au mois de mai avec une température maximale au mois d'octobre.

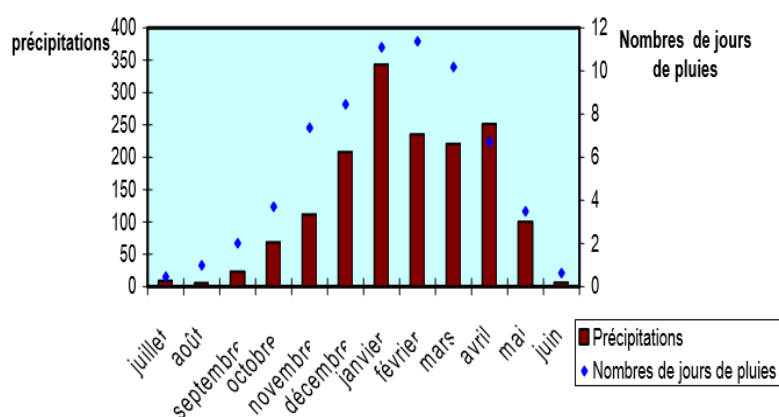
La saison fraîche et sèche du mois de juin au mois de septembre. La température minimale est en mois de juillet avec 5,5°C. Pendant l'été la forte précipitation orageuse est apportée par la mousson. Pendant cette période, des perturbations cycloniques peuvent toucher toute la région du Vakinankaratra.

Le massif appartient au bioclimat « subhumide » avec une saison sèche et la température minimale absolue est très faible (22°C). L'écart entre la température du jour et de la nuit est énorme (21°C) sur le massif.

I.4.2. Précipitations

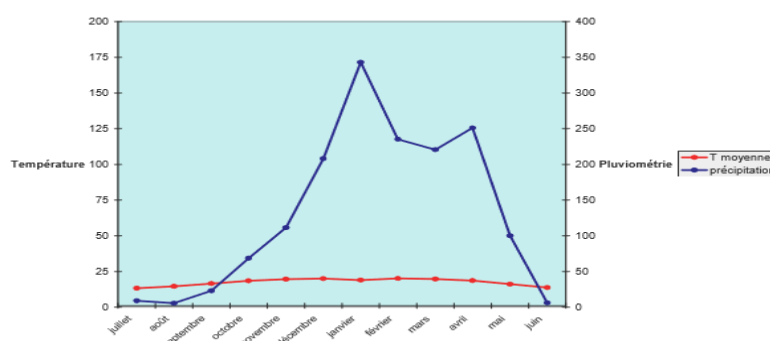
Les mois les plus arrosés sont du mois de novembre jusqu'au mois d'avril. Le nombre de jour de pluie est maximum au mois de janvier avec 343,1 mm qui se répartissent en 11 jours. Le mois d'août est le mois le plus sec avec seulement 5,66 mm qui se répartissent en 0,99 jours.

Figure 2: Variation annuelle de la précipitation de la station d'Antsirabe et nombre de jours de pluies (1991-2000)



Source : Service Météorologique d'Ampanzianomby

Figure 3: Diagramme obrothermique de la station d'Antsirabe (1991-2001) d'après la modèle de Gaussen P=2T



Source : Service Météorologique d'Ampandrianomby

Si la courbe des températures est au-dessus de la courbe des précipitations, le mois est écologiquement sec et si la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe des températures, le mois est écologiquement humide.

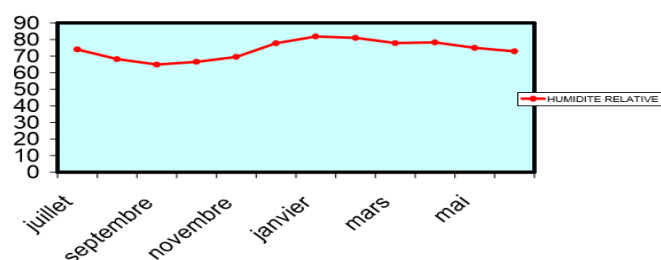
Ainsi on a deux saisons bien distinctes :

- La saison chaude et humide du mois d'octobre au mois de mai.
- La saison fraîche et sèche du mois de juin jusqu'au mois de septembre.

I.4.3. Humidité relative

L'humidité relative est élevée, celle-ci est attribuée aux brouillards matinaux quasi- permanents dans la région. Cette humidité relative est faible à la fin de la saison fraîche et au début de la saison sèche.

Figure 4: Variation d'humidité relative de la station d'Antsirabe



Source : Service Météorologique d'Ampandrianomby

I.4.4. Vent

L'alizé austral est le vent du Sud- Est qui souffle presque toute l'année. Il apporte une humidité importante sur la partie Est du massif. Cette masse d'air, une fois déchargée de son humidité, provoque un effet de Foehn. L'effet de Foehn c'est que l'alizé en remontant les hautes terres perd beaucoup d'humidité. C'est pour cela que la partie occidentale du massif est écologiquement sèche. Des ruisseaux traversent toutes les vallées du massif. Ces ruisseaux se déversent toutes dans la rivière Manandona qui délimite le massif à l'Est.

Le massif est un véritable château d'eau pour certaines plaines à cause de la présence de plusieurs sources : Sahamadio, Analatanterahina du fokontany Ambohimananarivo.

I.5. Sol

Le type de formation végétale qui s'y trouve dépend du type de sol sur le massif :

- Sous la végétation sclérophylle, on a un sol sableux de couleur blanche.
- Sous savane, c'est un sol ferrallitique compact. Cependant, attaqué par l'érosion, des gigantesques effondrements produisent le phénomène de lavakisation.
- Au fond des ravins, des sols hydromorphes riches en matières organiques s'y trouvent.

CHAPITRE I. REALISATION D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE PAR STATION TOTAL**I. Généralités****I.1. Définition**

Le levé de détails est l'ensemble des opérations intervenant dans un levé topographique et consistant à déterminer à partir des points du canevas d'ensemble, polygonal ou détails, la position des différents objets d'origine naturelle ou artificielle existant sur le terrain.

Le levé, nom donné au document résultant d'un lever, est destiné, éventuellement après traitement numérique, à l'établissement de plans graphiques ou numériques : c'est la phase de report.

I.2. Le principe de base

Lors d'un lever, le topographe est confronté à trois problèmes principaux :

- Déterminer les détails à lever ;
- Définir le degré de précision ;
- Arrêter les mesures à effectuer.

I.3. Les détails à lever

Le choix des détails dépend essentiellement de deux caractéristiques : leur type et leur taille. La taille minimale des détails à lever est directement liée à l'échelle du plan. En effet, les plans topographiques ont des destinations différentes et des objets nécessaires à certains seront inutiles pour d'autres. Dans ce cas, il va falloir faire une sélection en fonction du type de plan à élaborer. On admet en général que le pouvoir séparateur de l'œil humain est d'un dixième de millimètre. Les détails non représentables ne sont donc pas levés. Pour les plans numériques, susceptibles de générer des plans graphiques à différentes échelles, il faut se référer au cahier de charge.

I.4. La précision du levé

La précision d'un levé ou d'un plan est liée directement à la précision avec laquelle les détails sont levés. Les plans peuvent être classés suivant le type de lever : expédié ou régulier, l'échelle d'un document est définie par la formule :

$$e = \frac{D_{plan}}{D_{terrain}} \quad (1)$$

Un lever est dit régulier si la détermination des détails est effectuée avec une erreur qui, réduite à l'échelle du levé, est inférieure ou égale à l'erreur graphique, soit un dixième de millimètre, plus petit écart perceptible à l'œil sur le plan, dans le cas contraire, le lever est dit expédié ou irrégulier.

I.5. Les mesures à effectuer

Le principe fondamental de la topographie qui consiste à aller de l'ensemble vers le détail doit être strictement respecté.

Les points de détail seront donc rattachés à un canevas, même si ce dernier se compose uniquement de quelques points, d'une simple ligne d'opération. Un levé correctement mené doit assurer un maximum d'homogénéité entre les différents points de détails. Chaque canevas sera donc rattaché si possible par un minimum de mesure courte et indépendante. On n'oubliera pas d'effectuer des mesures surabondantes de contrôle.

Mais il faut noter que chaque levé de détails doit s'accompagner d'un croquis de levé aussi précis, soigné et descriptif que possible. Ce croquis est une aide précieuse lors de l'établissement du plan définitif.

I.6. Méthodes et moyens de lever

Les méthodes de lever et les moyens à mettre en œuvre dépendent de plusieurs facteurs, essentiellement :

- La destination du plan : graphique, numérique...
- L'objet du plan : intérieur, propriété, parcellaire, alignement...
- De la nature du terrain : relief, étendue, distance des points...
- De la disponibilité du matériel dans l'entreprise
- Du cahier de charge
- Du prix de revient des opérations et des détails impartis

Par la suite, ces méthodes seront classées en deux catégories :

☞ Les méthodes traditionnelles, qui sont peu à peu abandonnées ; elles utilisent le matériel classique du géomètre-topographe : ruban, fil, niveau, cercles, goniomètres, goniographes, théodolites, tachéomètres, boussoles, jalons, équerres optiques... ;

☞ Les méthodes modernes sont basées sur l'emploi des stations totales, du GPS et désormais du drone. Le lever altimétrique sera traité à part.

II. Travaux préliminaires

II.1.Pré-reconnaissance

Avant de commencer tous les travaux, il est nécessaire de faire une préparation au bureau. Le but est de faciliter la réalisation des travaux sur terrain.

II.1.1. Collecte des données nécessaires

On doit regrouper les documents topographiques et les informations utiles lors de la réalisation des travaux. Les données de base sont:

- Plan topographique de la zone (2011-2014) ;
- Orthophoto de la zone.

II.2.Etude préliminaire

L'étude au bureau consiste à faire : Premièrement, l'analyse de toutes les données nécessaires afin d'établir le plan d'exécution topographique. Ces études permettent au topographe d'avoir une idée de chantier c'est-à-dire d'établir la planification des travaux topographiques, de matérialiser sur la carte ou sur le plan l'emplacement de canevas, d'envisager tous les techniques et méthodes à utiliser, d'évaluer les moyens personnel, les matériels et les outillages.

- Travaux préparatoires de la polygonation

L'étude de l'emplacement des points de la polygonation se fait sur une orthophoto. On a utilisé l'orthophoto d'Ibity effectuée en 2007 avec une précision de 25 cm. La mise en place de ces points nécessite des conditions. Tout d'abord, La distance entre les bornes doit être équidistante si possible c'est-à-dire mesurer à partir de l'orthophoto et piquer leur emplacement.

- Travaux préparatoires pour l'implantation

Dans les données initiales les coordonnées des points à implanter se trouvent déjà dans le plan avec leurs points de base. Les travaux à faire sont d'étudier la méthode utilisée ou adoptée pour faciliter la réalisation.

II.3. Reconnaissance

La reconnaissance sert à vérifier sur le terrain l'exactitude de l'hypothèse dans l'étude ci-dessus sinon il faut adapter et soulever les problèmes selon les cas. C'est donc un travail de terrain. Elle a pour but de voir sur terrain les moyens techniques et matériels pour réaliser les travaux.

Il faut donc faire un « checking » de la liste suivante :

- Vérifier la véracité des documents rassemblés dans les travaux de préparation : Existence et accessibilité des points géodésiques, faire l'état des lieux : le relief de la zone, couverture végétale, zone inondable...
- Faire le bon choix des points d'appui en respectant les conditions suivantes : Stationnable, stable, intervisibilité entre quelques points, privée du masque qui peut gêner l'utilisation du GPS (fil à haute tension ou à côté d'une antenne parabolique) ; bien repart, distance maximale entre les points (limite d'utilisation des appareils). S'assurer de la possibilité de passage des visées pour les points d'appui et pour les points de détails

II.3.1. Matérialisation

C'est l'opération pendant la période de reconnaissance. Avant de commencer tous les levés, les points de la polygonale de base sont matérialisés par des bornes en béton préfabriquées ou coulées sur place dont les 2/3 sont ancrés dans le sol et marqué par un trait gravé, des clous ou des fers ronds dans leur axe. La borne a une forme parallélépipédique dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 1: Caractéristiques des bornes

Désignations	Dimension
Hauteur de la borne	40 cm
Côte de la base	30cm
Fer 8 avec dépassement 2cm de la cadre	50 cm

Source : Auteur, année 2015

Photo 3: Point de station

Source : Auteur, année 2015

II.3.2. Point de rattachement

Pour le rattachement nous avons pris trois bornes matérialisées dans la zone d'étude, puis marqué leurs coordonnées par un GPS bi fréquence.

Le GPS Global Positionning System est un système de positionnement à l'échelon mondial. Il donne les coordonnées géocentriques (x, y, z) et les coordonnées géodésiques géographiques (latitude, longitude et la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde) et la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde GRS80 dans le système mondial appelé WGS84. Ces points sont adaptés en coordonnées Laborde.

Photo 4: Récepteur GPS (Trimble5800)

Source : Auteur, année 2015

II.3.3. Pour le levé de détails [3]

L'entreprise SECAM dispose des matériels modernes qui permettent d'obtenir une bonne précision pour la réalisation des opérations topographiques. Pour le levé, on a utilisé la station total Leica TCR 303, c'est un tachéomètre électronique de haute qualité connu pour les chantiers de construction. Doté d'une technologie innovante, il rend plus facile les travaux de topographie quotidiens. Elle peut être reliée avec un GPS bi fréquence et faire les deux levés en même temps.

Cet instrument est particulièrement adapté aux travaux de construction simples et aux implantations.

Photo 5: La station total Leica TCR303



Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

☞ **Caractéristiques et modes de mesure**

Mesure de distance (AR : infrarouge)

Type : laser rouge visible

Longueur d'onde porteuse 0.780 m

Système de mesure : Système de fréquence spécial Base 100 Mhz = 1.5 m

Alignement EDM : coaxial

Affichage (plus petite unité) : 1 mm

Tableau 2: Types de mesure avec précision

Programme de mesure EDM	Précision*(Déviation standard)	Temps de mesure
Mesure précise	2 mm + 2 ppm	<1sec
Mesure rapide	5 mm + 2 ppm	<0.5sec
Tracking	5 mm + 2 ppm	<0.3sec
Cible réfléchissante	5 mm + 2 ppm	<0.5sec

Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

* Les interruptions du faisceau, les fortes brumes de chaleur et les déplacements d'objets dans le faisceau peuvent provoquer des altérations de la précision annoncée.

Tableau 3: Portée maximale selon le réflecteur

Portée (mesure normale+rapide)				
	Prisme standard	Réflecteur 360°	Feuille réfléchissante	Mini-prisme
1	1800 m (6000 ft)	800m (2600ft)	150m (500ft)	800m (2600ft)
2	3000 m (10000 ft)	1500 m (5000 ft)	300m (950ft)	1000 (3300ft)
3	3500 m (12000 ft)	2000m (7000ft)	300m (950ft)	2000m (7000ft)

Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

1) très brumeux, visibilité 5 km, ou bien extrêmement ensoleillé, avec de forts courants de chaleur.

2) légèrement brumeux, visibilité 20 km, ou partiellement ensoleillé, avec de faibles courants d'air.

3) couvert, sans humidité, visibilité 40 km, pas de courant d'air.

Mesure de distance (SR : visible)

Type : laser rouge visible

Longueur d'onde porteuse 0.670 m

Système de mesure : Système de fréquence spécial Base 100 Mhz = 1.5 m

Alignement EDM : coaxial

Affichage (plus petite unité) : 1 mm

Taille du rayon laser : env. 7x 14 mm / 20 m ; env. 10 x 20 mm / 50 m

Mesure de distance (sans réflecteur)

Plage de mesure : 1.5 m à 80 m (sur surfaces naturelles 710 333)

Netteté de l'affichage : 760 m

Constante de prisme : + 34.4 mm

Tableau 4: Portée sans réflecteur

Portée sans réflecteur		
Conditions atmosphériques	Sans réflecteur (cible blanche)*	Sans réflecteur (grise, albédo 0.25)
4	60m (200ft)	30m (100ft)
5	80m (260ft)	50m (160ft)
6	80m (260ft)	50m (160ft)

Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

*Grey Card de Kodak utilisée avec posemètre pour la lumière réfléchie.

- 4) Objet au soleil, forts courants de chaleur
- 5) Objet à l'ombre ou par ciel couvert
- 6) Au crépuscule

Tableau 5: Mode de mesure

Programme de mesure EDM	Précision** (Déviation standard)	Temps de mesure
Court	3mm+2ppm	3.0 sec. +1.0 sec. /10m > 30m
Prisme	5mm+2ppm	2.5 sec
Tracking	5mm+2ppm	1.0 sec. +0.3 sec. /10m > 30m

Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

** Les interruptions du faisceau, les fortes brumes de chaleur et les déplacements d'objets dans le faisceau peuvent provoquer des altérations de la précision annoncée.

Mesure de distance (longue portée, avec réflecteur)

Plage de mesure : à partir de 1000 m

Netteté de l'affichage : 12 km

Tableau 6: Portée avec réflecteur

Portée avec réflecteur		
Conditions atmosphériques	Prisme standard	3prismes (GPH3)
1	1500 m (5000 ft)	2000 m (7000 ft)
2	5000 m (16000 ft)	7000 m (23000 ft)
3	> 5000 m (16000 ft)	> 9000 m (30000 ft)

Source : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

- 1) très brumeux, visibilité 5 km, ou bien extrêmement ensoleillé, avec de forts courants de chaleur.
- 2) légèrement brumeux, visibilité 20 km, ou partiellement ensoleillé, avec de faibles courants d'air.
- 3) couvert, sans humidité, visibilité 40 km, pas de courant d'air.

III. Description des opérations sur terrain

III.1. Etalonnage

Durant le processus de fabrication, les erreurs instrumentales sont déterminées avec soin et mises à zéro. Mais il existe toujours des erreurs qui peuvent varier et il est fortement conseillé de les vérifier dans les situations suivantes :

- avant la première utilisation
- avant toute mesure de haute précision
- après des transports longs et rudes
- après de longues périodes de travail

III.2. Ajustement

La base de travail topographique est la précision. On est recommandé d'étalonner ou ajuster l'appareil pour connaître l'écart-type de l'appareil. Pour la station total TCR303, il existe un ajustement automatique sur l'option de l'appareil.

III.2.1. Ajustement mécanique

- Pour l'ajustement des accessoires cela se fait manuellement c'est -à- dire bien serrer les boulons ;
- Pour les nivelles, les bulles doivent être calées sur le tableau électronique de l'appareil ;
- Pour le laser, seul le laboratoire du constructeur pourrait l'ajuster.

III.2.2. Ajustement électronique

La méthode d'observation se fait comme ceci :

- Angle horizontal :

Pointez la lunette avec une précision sur une cible environ de 100m de distance, la cible doit être située dans une plage de ± 10 gons par rapport au plan horizontal. La procédure peut démarrer dans n'importe quelle position de la lunette. Ensuite, on tourne l'appareil à 200 gons et on vise de nouveau la cible, une fois ces opérations terminées, l'erreur s'affiche automatiquement sur l'écran ;

➤ Angle vertical :

Pointer la lunette avec précision sur une cible distante environ 100m, la cible doit être située au moins 30gons en dessous ou au-dessus du plan horizontal. La procédure peut démarrer dans n'importe quelle position de la lunette, on tourne l'appareil à 200 gons et on vise de nouveau la cible. Une fois ces opérations terminées, l'erreur s'affiche automatiquement sur l'écran.

III.3. Déterminations des coordonnées des points de rattachement [4]

III.3.1. Principe du système GPS

Global Positioning System (ou système GPS) repose sur un système mettant en relation plusieurs satellites (24 satellites tournent en permanence autour du globe à une altitude de 20 200km), de stations de contrôle terrestres et des utilisateurs munis de récepteurs GPS. Chaque satellite envoie un signal radio indiquant sa position exacte. Le récepteur GPS capte le signal et calcule le temps écoulé depuis qu'il a été émis par le satellite. Il calcule ainsi la distance qui le sépare du satellite. En combinant les signaux provenant simultanément des quatre satellites, le récepteur détermine sa position exacte à la surface de la terre.

Pour avoir les coordonnées de la station, il suffit de mettre le récepteur en marche et en quelques minutes on aura les coordonnées (x, y, z) à n'importe quel moment, n'importe où et en temps réel.

III.3.2. Stratégie d'observation par méthode différentielle

L'utilisation des deux récepteurs est obligatoire ; un récepteur fixe étant placé sur un point de référence (point connu), et l'autre sur le point à déterminer. Et comme la distance de la ligne de base est inférieure à 2km avec des récepteurs bi fréquences et une cadence d'acquisition de 5 secondes ; 20 minutes ont suffi pour avoir des meilleurs résultats.

Pour cela il faut avoir deux récepteurs, observer le point dans un temps suffisant pour fixer les ambiguïtés entières et faire les observations simultanément pour que les observations soient les mêmes :

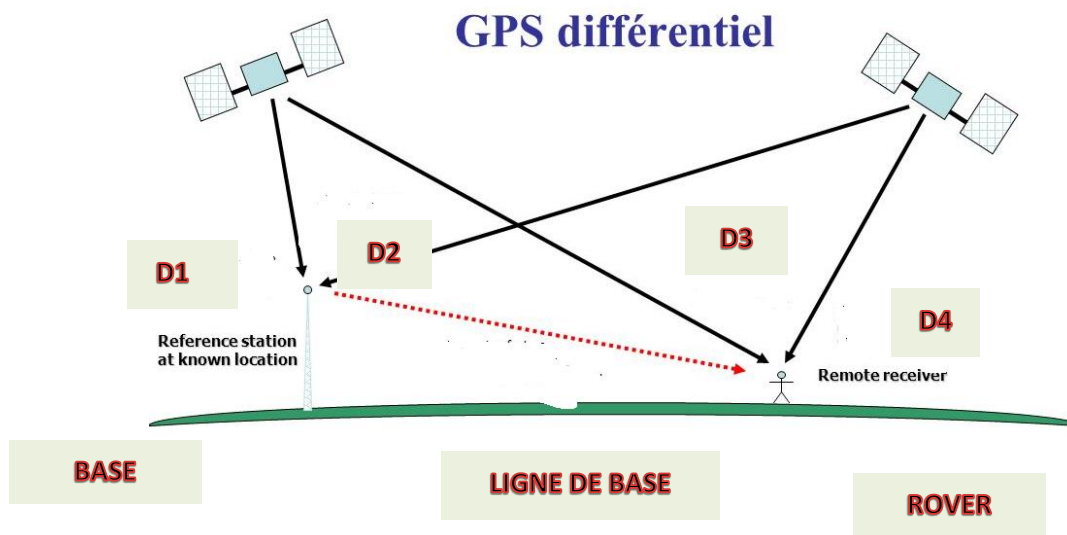
- ☞ Satellites
- ☞ Conditions atmosphériques

Durant l'observation, il faut noter :

- Le nom du fichier
- Le nom du point observé
- Les heures de début et fin d'observation
- La hauteur d'antenne

Dans tous les cas il faut bien repartir la fiche d'observation et chaque point doit avoir une fiche.

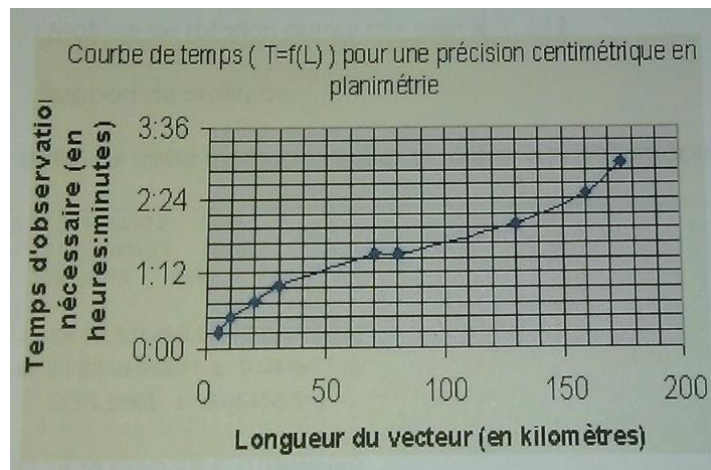
Figure 5: Méthode différentielle [5]



III.3.3. La précision

La précision d'observation en planimétrie dépend surtout :

- ☞ Du temps d'observation
- ☞ De la longueur de la ligne de base

Figure 6: Courbe de temps [4]

D'après cette courbe, avec une ligne de base de 10km le temps d'observation est à peu près 20 minutes. Donc pour notre cas avec des lignes de base inférieure à 5km le temps de l'observation est aussi de 20minutes avec un appareil bi fréquence, qui sera un temps d'observation suffisant pour résoudre l'ambigüité entière.

☞ Transformation des coordonnées

On sait très bien que les coordonnées obtenues par GPS sont exprimées en WGS84 donc il faut faire une transformation ou adaptation de ces coordonnées en Laborde Madagascar.

L'adaptation consiste à déterminer au moins trois points dans les deux systèmes Laborde et WGS84, et à calculer les paramètres de transformation temporaires.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Laborde}} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + k * R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS84}}$$

Où X, Y, Z : les coordonnées géodésiques géocentriques

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: les translations entre les origines de deux ellipsoïdes

R : Matrice de rotation autour des axes X, Y, et Z

k : Rapport de similitude

Tableau 7: Les coordonnées Laborde des points de rattachement

N°	X	Y
01	457704,3575	671757,5034
02	457642,6542	671775,3277
03	457710,3015	671968,4488
04	457713,3086	671967,3942
05	457793,6555	671743,6695
06	457809,7151	671731,6444

Source : Auteur, année 2015

III.4. Méthodes d'observation des sommets

III.4.1. Polygonation

Le canevas est composé de 5 stations. La polygonation sert à l'établissement des points amers utiles. On a établi un cheminement fermé pour générer le modèle numérique de terrain et pour réaliser la courbe de niveau.

III.4.2. Les matériels et le personnel

Pour assurer le bon fonctionnement des opérations sur terrain, il faut bien organiser le travail dès la reconnaissance. Ainsi, l'équipe est composée de 5 personnes d'après ce tableau :

Tableau 8: Moyen personnel et matériel pour la polygonation

Ressource	Nombre	Observation
Topographe	3	Chef de brigade, Opérateur, Croquiseur
Manœuvre	2	Porte prisme, Aide
Station total + Accessoires	1	Leica TCR303

Source : Auteur, année 2015

III.4.3. Méthodologie

- Mesure des angles horizontaux

L'angle horizontal est l'angle que fait la référence avec le point visé. Pour minimiser l'erreur et avoir plus de précision sur les observations, on mesure les angles par tour d'horizon avec réitération.

On dit qu'on effectue un tour d'horizon lorsqu'on choisit une direction comme référence et vise successivement des points à partir d'une seule station et en le fermant sur cette référence avec une nouvelle lecture.

La réitération est un procédé consistant à décaler l'origine du limbe entre deux séquences.

On appelle séquence, un ensemble de lectures effectuées à partir d'une même station sur des directions différentes avec la même position des cercles horizontaux, en fermant la lecture à la référence.

- Les observations

On stationne au point de station, on vise la référence. Dès que la visée de référence est faite, on introduit l'origine 0.

A chaque visée, on doit avoir au moins trois pointés en basculant le fin pointage pour avoir plus de précision. Ensuite, on vise l'autre point et on effectue le double retournement (CG, CD). Cela permet :

- De doubler les lectures et donc de diminuer le risque de faute de lecture ;
- De ne pas toujours lire sur la même zone du limbe ;
- D'éliminer les défauts de collimation horizontale et de tourillonnement.

S'il y a une faute de lecture, on refait tout de suite les observations. Après, on change d'origine.

Cette méthode est la même pour chaque station.

- Mesure des angles verticaux

C'est l'angle mesuré dans le plan vertical.

La détermination de l'angle est faite par double retournement à chaque origine. L'intérêt de faire cette méthode est de limiter les fautes de lecture et d'éliminer certaines erreurs systématiques et accidentelles entre autre le Z0 de l'appareil.

La méthode d'observation est la même que sur l'angle horizontal en visant le centre du prisme.

A chaque origine, la valeur de l'angle vertical est donnée par :

$$V_1 \text{ ou } V_2 = \frac{(400 - CD) + CG}{2} ; \text{ la moyenne } V(gon) = \frac{V_1 + V_2}{2}.$$

- L'erreur commise :

➤ **Erreurs systématiques :**

Elles résultent à l'imperfection lors de la fabrication de l'appareil. Ce sont :

- **Erreur de collimation** : c'est le défaut de non perpendicularité de l'axe optique de la lunette et son axe de tourillon;
- **Erreur de tourillonnement** : c'est le défaut de non horizontalité de l'axe de tourillon ;
- **Erreur du limbe** : c'est l'axe principal qui ne coïncide pas avec le centre du cercle horizontal ;
- **Erreur d'index du cercle vertical** : C'est-à-dire l'index du cercle vertical n'est pas situé sur le vertical du centre du cercle ;
- **Erreur d'excentricité du viseur** : C'est l'axe de visée qui ne coupe pas l'axe principal ou l'axe secondaire.

➤ **Erreurs accidentelles :**

- **Erreur de calage de l'axe principal** 4mm pour la mise en station ;
- **Erreur du pointé**
- **Erreur de lecture**
- **Erreur de dérivé de zéro de l'appareil** : due à la torsion du trépied.

III.4.3.1. Mesure de distance

La distance obtenue est la distance suivant la pente. Elle est obtenue en faisant la moyenne de 4 séquences. (Pour plus de détail sur cette méthode veuillez se référer à l'annexe 2).

III.4.3.2. Le levé d'altitude

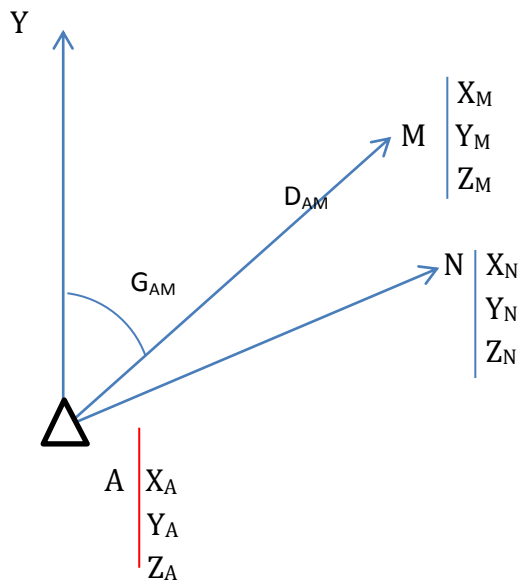
On a déterminé l'altitude par nivellement indirect. (Pour plus de détail sur cette méthode veuillez se référer au traitement des données).

III.4.3.3. Etablissement des points d'appui

Pour les points des calages, on a procédé de la même façon que la détermination des points de rattachement.

III.4.3.4. Levé de détails

Le levé de détails se fait à partir de la méthode par rayonnement en stationnant sur les points de base. C'est un procédé de détermination des coordonnées d'un point inconnu M connaissant les coordonnées d'un point A en déterminant la direction AM et la distance AM. (Pour plus de détail sur cette méthode veuillez se référer au traitement des données).



A : Point connu

M et N : Points inconnus ou à déterminer

G_{AM} : Gisement d'AM

D_{AM} : Distance d'AM

\triangle : Point géodésique

Le personnel :

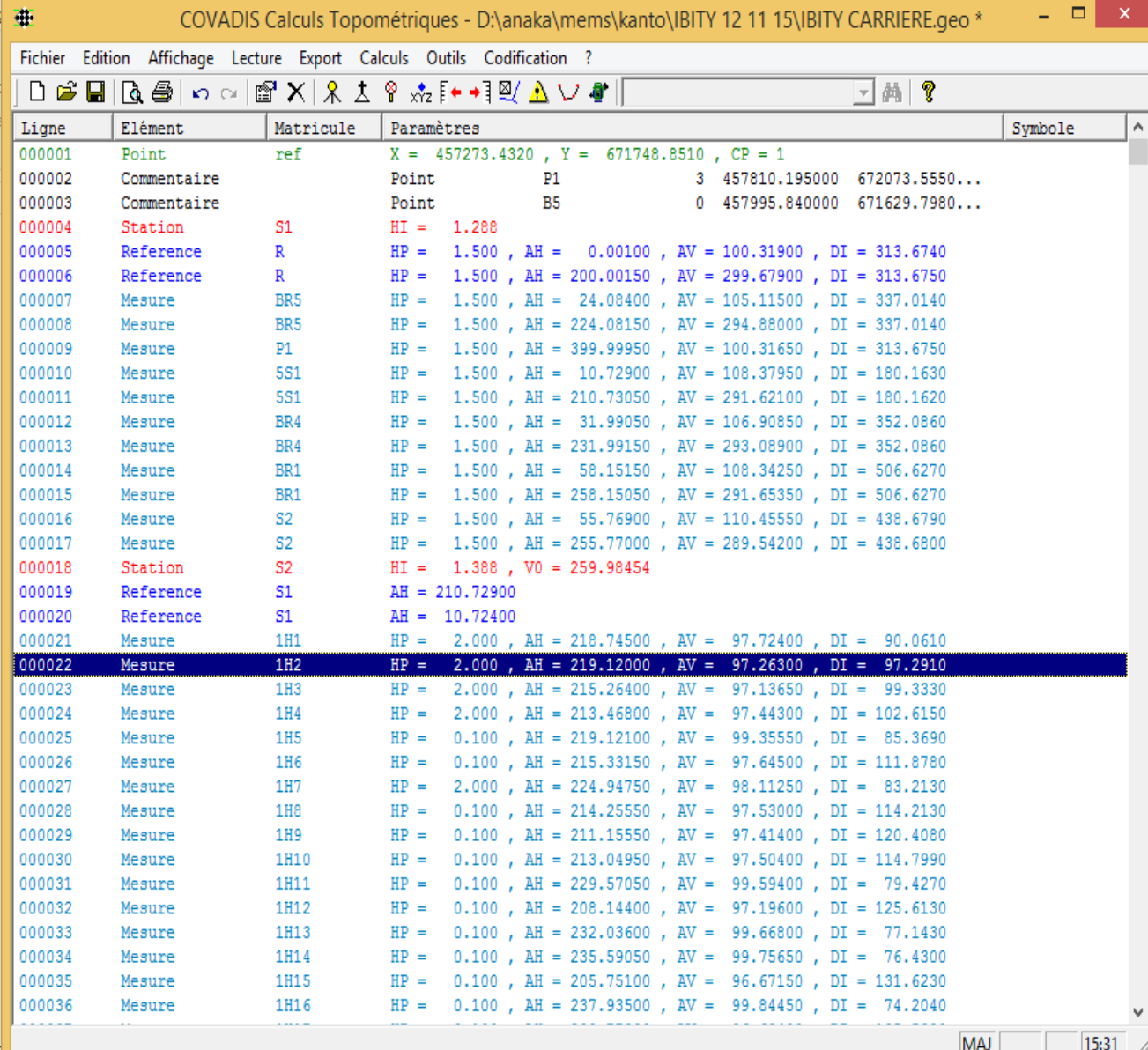
- Un chef de brigade, qui dirige et contrôle tous les travaux
- Un opérateur pour manipulation de l'appareil
- Un Croquiseur réalisant le croquis de terrain et piquer le numéro de point dans le croquis
- Deux manœuvres : porte prisme, décapage et aide...

IV. Traitement des données

IV.1. Intégration des données

Le logiciel AUTOCAD- COVADIS est le logiciel utilisé pour le traitement des données. Il permet de réaliser tous les calculs topométriques, les plans topographiques, et beaucoup d'autres. Le fichier produit est un fichier de type DWG.

En effet, il y a deux façons d'acquisition des données : soit par carnet électronique (notre cas) soit par saisie manuelle. Les données collectées sur terrain seront donc transférées sur COVADIS pour les calculs et le dessin.



COVADIS Calculs Topométriques - D:\anaka\mems\kanto\IBITY 12 11 15\IBITY CARRIERE.geo *

Fichier Edition Affichage Lecture Export Calculs Outils Codification ?

Ligne	Elément	Matricule	Paramètres	Symbole
000001	Point	ref	X = 457273.4320 , Y = 671748.8510 , CP = 1	
000002	Commentaire		Point P1 3 457810.195000 672073.5550...	
000003	Commentaire		Point B5 0 457995.840000 671629.7980...	
000004	Station	S1	HI = 1.288	
000005	Reference	R	HP = 1.500 , AH = 0.00100 , AV = 100.31900 , DI = 313.6740	
000006	Reference	R	HP = 1.500 , AH = 200.00150 , AV = 299.67900 , DI = 313.6750	
000007	Mesure	BR5	HP = 1.500 , AH = 24.08400 , AV = 105.11500 , DI = 337.0140	
000008	Mesure	BR5	HP = 1.500 , AH = 224.08150 , AV = 294.88000 , DI = 337.0140	
000009	Mesure	P1	HP = 1.500 , AH = 399.99950 , AV = 100.31650 , DI = 313.6750	
000010	Mesure	SS1	HP = 1.500 , AH = 10.72900 , AV = 108.37950 , DI = 180.1630	
000011	Mesure	SS1	HP = 1.500 , AH = 210.73050 , AV = 291.62100 , DI = 180.1620	
000012	Mesure	BR4	HP = 1.500 , AH = 31.99050 , AV = 106.90850 , DI = 352.0860	
000013	Mesure	BR4	HP = 1.500 , AH = 231.99150 , AV = 293.08900 , DI = 352.0860	
000014	Mesure	BR1	HP = 1.500 , AH = 58.15150 , AV = 108.34250 , DI = 506.6270	
000015	Mesure	BR1	HP = 1.500 , AH = 258.15050 , AV = 291.65350 , DI = 506.6270	
000016	Mesure	S2	HP = 1.500 , AH = 55.76900 , AV = 110.45550 , DI = 438.6790	
000017	Mesure	S2	HP = 1.500 , AH = 255.77000 , AV = 289.54200 , DI = 438.6800	
000018	Station	S2	HI = 1.388 , VO = 259.98454	
000019	Reference	S1	AH = 210.72900	
000020	Reference	S1	AH = 10.72400	
000021	Mesure	1H1	HP = 2.000 , AH = 218.74500 , AV = 97.72400 , DI = 90.0610	
000022	Mesure	1H2	HP = 2.000 , AH = 219.12000 , AV = 97.26300 , DI = 97.2910	
000023	Mesure	1H3	HP = 2.000 , AH = 215.26400 , AV = 97.13650 , DI = 99.3330	
000024	Mesure	1H4	HP = 2.000 , AH = 213.46800 , AV = 97.44300 , DI = 102.6150	
000025	Mesure	1H5	HP = 0.100 , AH = 219.12100 , AV = 99.35550 , DI = 85.3690	
000026	Mesure	1H6	HP = 0.100 , AH = 215.33150 , AV = 97.64500 , DI = 111.8780	
000027	Mesure	1H7	HP = 2.000 , AH = 224.94750 , AV = 98.11250 , DI = 83.2130	
000028	Mesure	1H8	HP = 0.100 , AH = 214.25550 , AV = 97.53000 , DI = 114.2130	
000029	Mesure	1H9	HP = 0.100 , AH = 211.15550 , AV = 97.41400 , DI = 120.4080	
000030	Mesure	1H10	HP = 0.100 , AH = 213.04950 , AV = 97.50400 , DI = 114.7990	
000031	Mesure	1H11	HP = 0.100 , AH = 229.57050 , AV = 99.59400 , DI = 79.4270	
000032	Mesure	1H12	HP = 0.100 , AH = 208.14400 , AV = 97.19600 , DI = 125.6130	
000033	Mesure	1H13	HP = 0.100 , AH = 232.03600 , AV = 99.66800 , DI = 77.1430	
000034	Mesure	1H14	HP = 0.100 , AH = 235.59050 , AV = 99.75650 , DI = 76.4300	
000035	Mesure	1H15	HP = 0.100 , AH = 205.75100 , AV = 96.67150 , DI = 131.6230	
000036	Mesure	1H16	HP = 0.100 , AH = 237.93500 , AV = 99.84450 , DI = 74.2040	

MAJ 15:31

IV.1.1.Calculs

Les outils de COVADIS « calculs », permettent de récupérer les données « terrain » issus de la station total. Les données récupérées seront alors utilisées pour les calculs de points de levés.

Ces calculs se font à partir d'un éditeur de données « la GEOBASE ». Tous les paramétrages des calculs se font dans la Géobase, correction, tolérances, vérification et saisie des points d'appui. Les points calculés sont directement exploitables sous Autocad.

Tableau 9 : Coordonnées planimétriques

Point	H _z (gr)	H _{zc} (gr)	Gis, (gr)	DH (m)	Dprojection	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX _c (m)	ΔY _c (m)	X (m)	Y (m)
R										457672,67	672469,01
			394,4243								
S1	90,0741	90,075								457716,62	671968,49
			203,6971	211,25	211,17	-12,26	-210,97	-12,27	-210,99		
S2	119,6595	119,6611								457704,36	671757,50
			123,3582	211,68	211,59	197,51	-75,88	197,50	-75,90		
S3	153,3096	153,311								457901,86	671681,60
			76,6691	215,85	215,76	201,44	77,33	201,42	77,31		
S4	77,8727	77,8734								458103,28	671758,91
			354,5425	204,76	204,68	-134,04	154,71	-134,05	154,69		
S5	159,0786	159,0795								457969,22	671913,60
			313,6221	258,58	258,48	-252,59	54,90	-252,60	54,89		
S1										457716,62	671968,49
Fermeture	0,0055 gr					0,06	0,09				

Source : Auteur, année 2015

S

- Fermeture planimétrique

La compensation est valable si la fermeture angulaire est inférieure à la tolérance angulaire.

➤ La fermeture angulaire

$$Fa = \sum H_z (\text{observé}) - (n - 2) 200 \quad (2)$$

n : nombre de sommets de la polygonale

Application numérique :

n=5

Fa = 599,9945 – 600

$$Fa = - 0,0055 \text{ gon}$$

➤ La tolérance angulaire :

$$Ta = 2 \times 2.7 \times \delta a \times \sqrt{n} \quad (3)$$

Avec $\delta a = 8 \text{ dmgon}$; Erreur moyenne quadratique.

Application numérique :

n =5

$$Ta = 2 \times 2,7 \times 0.0008 \times \sqrt{5}$$

$$Ta = 0.0097 \text{ gon}$$

D'après le calcul ci-dessus, la tolérance angulaire est supérieure à la fermeture angulaire. On peut faire la compensation. Il existe plusieurs modes de compensation mais on utilise la compensation proportionnelle au nombre des stations car la distance de visée est homogène.

$$C = \frac{Ca}{n} \quad (4)$$

C : correction

Ca = - Fa : fermeture angulaire

Application numérique :

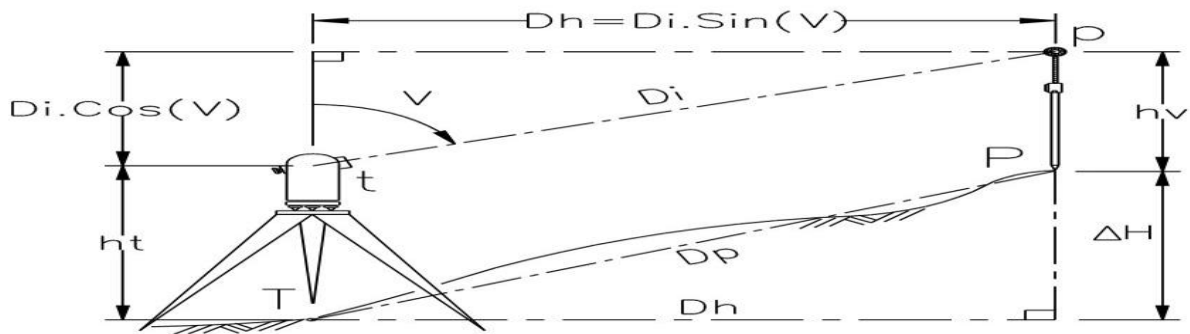
$$C = \frac{0.0055}{5}$$

$$C = 0,0011 \text{ gon}$$

IV.1.1.1. Détermination altimétrique des points

Le nivellement indirect est un nivellement par visées inclinées dans lequel les dénivelées s'obtiennent à partir des angles de pente et des distances.

Pour calculer la dénivelée entre deux points, l'angle de pente de la visée qui les joint est déterminé à l'aide d'un théodolite en stationnant sur l'un des points.



D'où l'altitude des points à déterminer est donnée par la formule suivante :

$$Z_p = Z_T + DH \cotg V + ht - hv + NA \quad (5)$$

Avec :

Z_T : Altitude connue de la station

h_v : Hauteur du prisme

h_t : Hauteur d'instrument

NA : Niveau apparent

- La correction à appliquer :

Une correction appelée Correction Niveau Apparent NA doit- être appliquée dès que la distance atteint plusieurs centaines de mètre tel que :

$$NA = \frac{D_h^2 (Km)}{15.2} \quad (6)$$

Tableau 10 : Coordonnées altimétriques

Station	DH	V	DZnc	Znc	Zc
S1				1561,99	1561,99
	211,2547	105,647538	-18,79		
S2				1543,2	1543,19
	211,678873	114,455888	-48,91		
S3				1494,29	1494,27
	215,84924	92,6563667	25,01		
S4				1519,3	1519,27
	204,76114	107,46778	-24,13		
S5				1495,17	1495,12
	258,583575	83,8852566	66,89		
S1				1562,06	1561,99
fermeture			0,07		

Source:Auteur,
année 2015

- La fermeture altimétrique :

$$f_Z = Z_{S1\text{ obs}} - Z_{S1\text{ calc}} \quad (7)$$

 $Z_{S1\text{ obs}}$: Altitude observée en S1 $Z_{S1\text{ calc}}$: Altitude exacte en S1Application numérique : $f_Z = 1562.06 - 1561.99$

$$f_Z = 7 \text{ cm}$$

- Tolérance altimétrique :

La tolérance altimétrique est donnée par la formule suivante pour un canevas ordinaire.

Puisque $n < 16$

$$T_z = \sqrt{(36l + \frac{l^2}{16})} \quad (8)$$

 l = nombre de dénivelée = 5

Application numérique : $T_z = \sqrt{(36 * 5 + \frac{5^2}{16})}$

$$T_z = 13 \text{ cm}$$

On voit que $F_z < T_z$ donc on procède à la compensation qui est donnée par la formule :

$$C = -F_z$$

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (9)$$

C_1 : correction

n = nombre de dénivelée

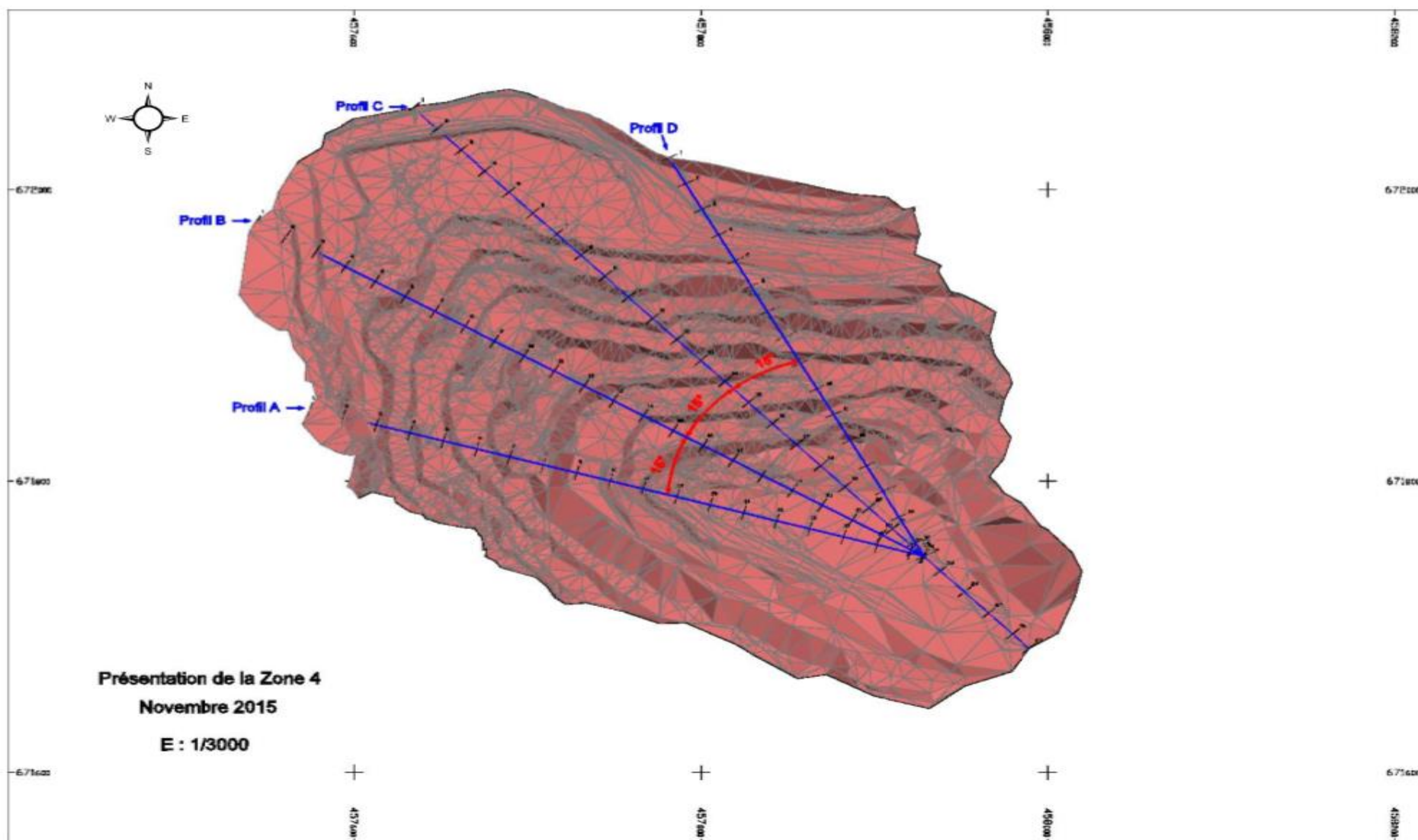
IV.2. Dessin

Une fois que les points sont calculés, on peut générer maintenant le dessin. On aura besoin du plan croquis fait sur terrain indiquant l'emplacement des points par rapport au carnet d'observation. Le plan croquis aidera à la réalisation du dessin.

IV.3. Mise en page et édition du plan

Une fois le dessin terminé, on peut mener la préparation du tracé. Les détails suivants seront insérés dans le plan :

- Légende
- Flèche nord
- Nom du dessinateur, date, titre...
- Carroyage
- Echelle du plan



IV.4. Coût de la mission

Personnel					
Désignation	Qualité	Nombre	Nombre jour	Taux journalier (Ar/J)	Total (Ar)
Chef de brigade	Ingénieur	1	5	100 000	500 000
Opérateur	Bac+ 3	1	5	40 000	200 000
Croquiseur	Bac+ 3	1	5	40 000	200 000
Porte- Prisme		1	5	10 000	50 000
Manœuvre		1	5	10 000	50 000
Prix total main d'œuvre					1 000 000
Matériels de production (TRAVAUX DE TERRAIN)					
Désignation	Nombre	Unité d'œuvre	Nombre/ Jour	Coût de location (Ar/J)	Total (Ar)
Station total avec accessoires	1	Jour	5	200 000	1 000 000
GPS bi fréquence	1	Jour	1	600 000	600 000
Ordinateur portable	1	Jour	5	60 000	300 000
Talkie-walkie	3	Jour	5	20 000	300 000
Prix total des matériels de production					2 200 000

Charges indirectes					
Désignation	Quantité	Unité d'œuvre	Nombre de jour	Taux Journalier (Ar/J)	Total (Ar)
4x4	1	Jour	5	100 000	500 000
Carburant	3	Litre/Jour	5	10 000	150 000
Hôtel	1	Jour	5	40 000	200 000
Total charges indirectes					850 000

TRAVAUX DE BUREAU				
Personnel				
Désignation	Nombre	Nombre du jour	Taux Journalier (Ar/J)	Total (Ar)
Chef de brigade	1	5	100 000	500 000
Opérateur	1	5	40 000	200 000
Matériel				
Ordinateur avec (Logiciel+Licence)	1	5	5 000 000	25 000 000

Donc, d'après les tableaux ci-dessus, le coût de production est de :

$$2\,200\,000 + 2\,600\,000 + 850\,000 + 25\,000\,000 = 30\,650\,000 \text{ Ar}$$

Pour la charge indirecte (électricité, ...), le coefficient est de $\sim 20\%$:

Ainsi, le coût de revient (*coût de production \times charge indirecte*) est de :

$$30\,650\,000 \text{ Ar} \times 1.20 = 36\,780\,000 \text{ Ar}$$

D'où le prix de vente (*coût de revient \times marge de 25%*) est de :

$$36\,780\,000 \text{ Ar} \times 1.25 = 45\,975\,000 \text{ Ar}$$

Enfin, on a $TVA = 20\%$

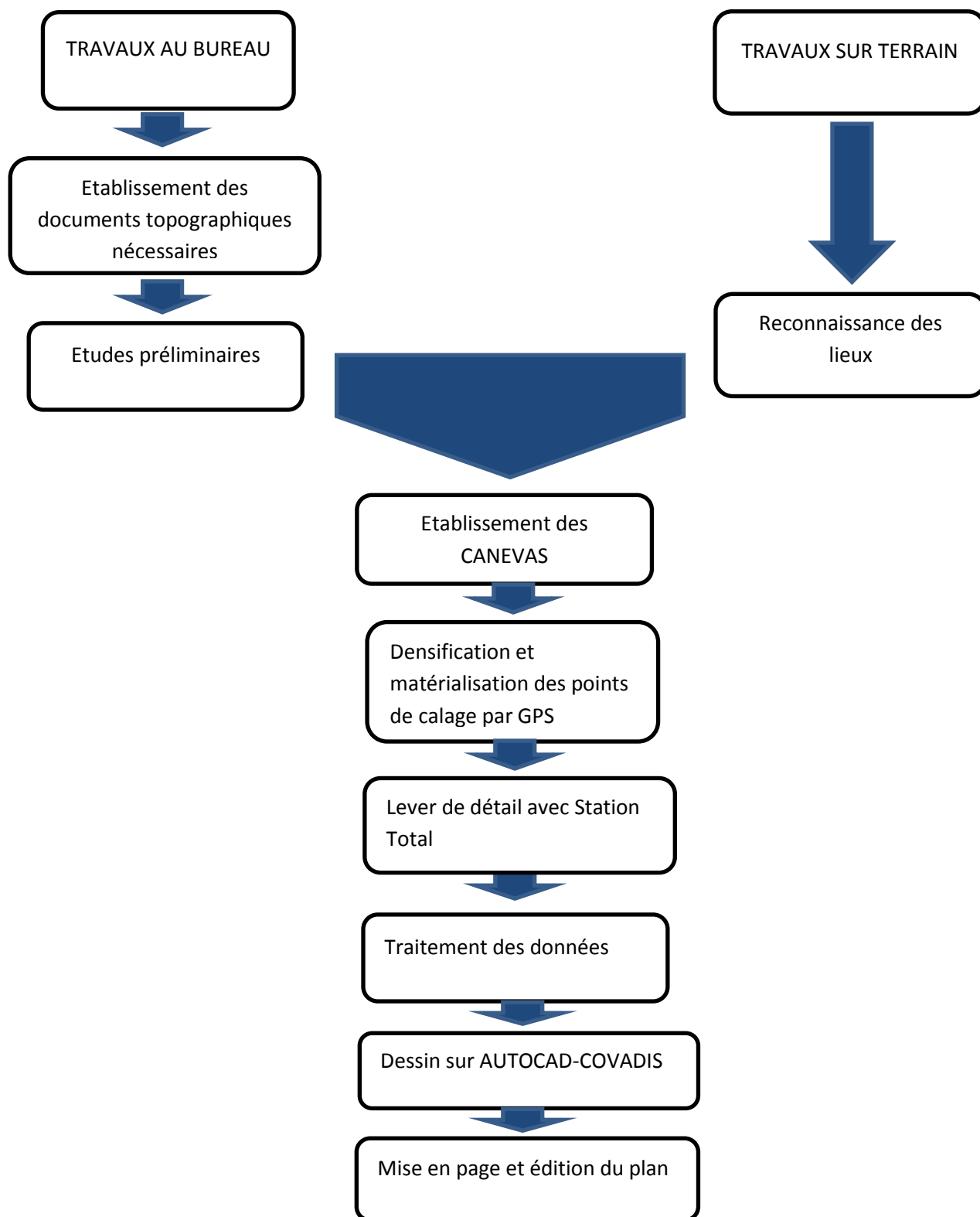
Alors le coût de production final est de :

$$45\,975\,000 \times 1.20 = 55\,170\,000 \text{ Ar TTC}$$

Le montant total estimatif du coût de production du projet est de : « **Cinquante-cinq millions cent soixante- dix mille Ariary** » toutes taxes comprises.

V. Organigramme de processus

Organigramme 1: Réalisation d'un plan topographique avec la station total



Source : Auteur, année 2015

CHAPITRE II : ETABLISSEMENT D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE A L'AIDE D'UN DRONE**I. Généralités****I.1. Définition**

La photographie aérienne est un domaine très vaste tant sur le plan de la variété des documents que des techniques employées. Les photographies aériennes sont des documents issus de prises de vues à partir de satellites, d'un avion ou de tout autre appareil volant et sur lequel on peut identifier des objets, des formes ainsi que leur arrangement spatial, et leurs relations.

Aujourd'hui, la photographie aérienne est une très bonne alternative pour mener des levés de terrain (chantier en cours, terrain naturel, etc.) précis et en temps record.

L'acquisition de données par drone apporte une définition très fine du levé et également une représentation graphique détaillée des zones inaccessibles par levé terrestre.

I.2. Les différentes fonctions de la photographie aérienne

Lors de la prise de vue aérienne ou de l'acquisition des données, le topographe est confronté à trois fonctions principales :

- Le pilotage ➡ pilote
- La navigation ➡ navigateur
- La photographie ➡ photographe

Ces trois forment une équipe qui doit être bien soudée.

I.3. La précision de la prise de vue aérienne

La précision de la prise de vue aérienne dépend de quelques paramètres à savoir :

- Du type de capteur qu'on utilise
- De la hauteur de vol
- Des conditions atmosphériques
- Du nombre de photos prises (recouvrement)

I.4. Les domaines d'utilisations

Tableau 11: Domaines d'utilisations de la photographie aérienne

ACTIVITE DES UTILISATEURS	CATEGORIES D'INFORMATION
<ul style="list-style-type: none"> -Exploration -Exploitation des ressources naturelles -Développement rural, urbain, régional -Génie civil -Application thématiques (géologie, forêt, ...) -Tourisme -Environnement 	<ul style="list-style-type: none"> -Hydrographie -Réseaux de communication, transmission -Zone de construction -Végétation -Limites administratives -Occupations -Propriétés -Diverses formes de construction -Représentation du relief

Source : Cours photo aérienne, année 2013

I.5. La méthodologie [6]

Après acquisition des données (photos aériennes), une fois au sol, les images seront analysées, traitées et corrigées par un logiciel de photogrammétrie afin d'éliminer les distorsions et notamment l'effet de déplacement et pour ensuite générer un modèle 3D. Ce modèle 3D utilise des points de calages au sol prédéterminés pour une précision optimale en X, Y, et Z.

On y calculera le Modèle Numérique de Terrain afin de pouvoir rectifier et corriger ainsi les erreurs associées aux déformations du relief.

A partir du modèle 3D géoréférencé, d'autres logiciels permettent de générer des livrables métiers : plans topos, cubatures, ortho-photo.

II. Historique et caractéristiques d'un drone

II.1. Historique du drone

II.1.1. Définition [7]

Le drone est un aéronef télécommandé, c'est-à-dire sans pilote à bord. Il embarque une charge utile qui lui permet de réaliser des missions diverses et variées : surveillance, renseignement, cartographie, transport, vidéo...

II.1.2. Présentation générale du système drone [8]

Ce qu'il faut plus justement nommer « système drone » consiste en une plate-forme mobile capable d'effectuer différentes tâches sans action directe de l'humain. Ainsi, grâce à la présence d'un Autopilote (intelligence artificielle de système), le drone peut évoluer en totale autonomie (décollage et atterrissage automatiques, navigation par GPS, contournement d'obstacles...). L'intelligence artificielle mise en œuvre dépend bien évidemment du type de plate-forme déployée (voilure fixe, voilure tournante, système captif,...), des opérations à effectuer (inspection d'ouvrage, suivi de linéaires...) et de l'environnement dans lequel la plate-forme drone évolue (indoor, outdoor...).

Au regard de ses capacités d'intervention et de ses différentes fonctions, nous pouvons décomposer le système drone en trois constituants principaux :

- Le vecteur (véhicule) aérien auquel peuvent être ajoutées des fonctions lui permettant d'évoluer sur terre, en milieu marin ou sous-marin : on parle alors de drone hybride ;
- Le ou les capteurs permettant l'acquisition, voire le prétraitement, des données nécessaires à la réalisation des tâches définies ;
- La station de contrôle en lien à la fois avec le vecteur pour la transmission des paramètres de l'opération et avec les capteurs pour l'éventuelle émission en direct des données (ces données peuvent également être stockées directement dans le système).

Au terme drone généralement employé par le grand public, les spécialistes aéronautiques préfèrent les appellations UAV (Unmanned Aircraft System) ou RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). En effet, ces acronymes qui fournissent une définition plus précise, permettent d'éviter l'amalgame entre systèmes civils, engins militaires et jouets.

II.1.3. Histoire [9]

La conceptualisation du drone remonte à la fin de la Première Guerre Mondiale. Alors qu'aux Etats-Unis se développe le projet Hewitt-Sperry automatic airplane, en France George Clémenceau, alors Président de la Commission sénatoriale de l'Armée, lance un projet « d'avions sans pilote » : le capitaine Max Boucher met au point un système de pilotage automatique qui fait voler sur plus de cent kilomètres un avion Voisin BN3. Ainsi, dans les années 1920, des avions sans pilote radio-commandés voient le jour, avec les tentatives de torpilles aériennes télécommandées par des ondes de télégraphie sans fil.

Hewitt-Sperry automatic airplane

La dénomination de « drone » (terme désignant en anglais un « faux bourdon », mâle de l'abeille) a été octroyée dans les années 1930 au Royaume-Uni par comparaison ironique à des Queen Bee : leur vol bruyant, lent et paresseux ressemble plus à celui du bourdon à la vie éphémère qu'à celui d'une reine abeille. Cette dénomination a perduré et s'est institutionnalisée.

Le premier drone français stricto sensu a été conçu, réalisé et expérimenté dès 1923 à Etampes par l'ingénieur Maurice Percheron et le capitaine Max Boucher. Toutefois, l'armée française n'y voyait pas encore d'intérêt militaire.

Le grand essor des drones date de l'époque de la Guerre Froide. Le drone a été développé de façon confidentielle par les Etats-Unis comme un moyen de supériorité stratégique et de rupture de capacité devant permettre la surveillance et l'intervention militaire chez l'ennemi sans encourir les risques humains que l'opinion ne supportait plus. En outre, il est utilisé pour larguer des tracts dans le cadre de la guerre psychologique.

Les drones sont engagés pour la première fois pendant la guerre du Viet Nam, puis lors de la guerre du Kippour. Ils font désormais partie des moyens tactiques et stratégiques du champ de bataille. L'absence de pilote permet d'opérer à l'intérieur des lignes ennemies pour des missions à risque, sans crainte de pertes humaines.

Le secteur de la défense constitue un vivier historique pour le développement de technologies de rupture qui sont par la suite réutilisées dans le domaine civil. Tel fut le schéma de développement du drone. Depuis plus de vingt ans maintenant, les drones ont été développés et utilisés en France dans un cadre militaire, pour des missions de surveillance et de renseignement. Suivant l'exemple de nombreuses innovations majeures initialement militaires (le satellite, le moteur à réaction, le GPS, internet), la technologie des drones a été adaptée depuis quelques années au secteur civil.

II.1.4. Evolution du domaine d'utilisation

L'outil drone, initialement créé pour des applications militaires, conquiert aujourd'hui des domaines civils de plus en plus nombreux. Du cinéma à l'auscultation d'ouvrages d'art, ses applications sont variées et il était légitime que les géomètres s'y intéressent également. **Reposant sur les principes de la photogrammétrie**, le drone semble d'emblée avoir sa place entre le lever terrain classique qui peut s'avérer fastidieux et le lever photogrammétrique par avion qui demande des chantiers de très grande ampleur pour être rentable.

Aujourd'hui, les drones réalisent le travail d'un géomètre et d'un topographe en limitant l'intervention humaine sur des sites dangereux ou inaccessibles.

II.2. Caractéristiques d'un drone

Il faut noter que, afin de mettre en place un protocole de qualification d'un système de prises de vues aériennes, toutes les étapes de la chaîne d'acquisition et de traitement ont été analysées. Tout d'abord le type de capteurs à embarquer, puis le protocole d'étalonnage à suivre, les critères à intégrer aux plans de vol en fonction des chantiers, et une phase de traitement des données. Plusieurs types de vols ont été réalisés afin de tester l'impact du type d'appareil photo embarqué, de la hauteur de vol, mais également pour tester la combinaison des vues nadirales et vues obliques dans l'optique d'obtenir des modèles 3D complets.

II.2.1. Choix du drone utilisé [10]

A ce jour, les drones disponibles sur le marché sont très variés et le choix peut être difficile pour les non spécialistes. En effet, il existe des drones permettant de réaliser des vols sur de très longues distances ou d'autres qui peuvent effectuer des vols

stationnaires et se déplacer aisément dans toutes les directions. Ces derniers drones sont des multicoptères. Leur temps de vol est limité, avoisinant les 20 minutes au maximum. Ce sont toutefois les drones les plus polyvalents et ceux-ci permettraient de réaliser un grand nombre de projets divers et variés. C'est pourquoi, on a choisi le DJI Phantom 3, il est tout nouveau, mais surtout, il convient très bien à l'opération qu'on a effectuée.

II.2.1.1. Présentation du drone utilisé [11]

Le DJI Phantom 3 représente la nouvelle génération de quadricoptères. Il garde le même format que ses grands prédécesseurs les DJI Phantom 1 et Phantom 2.

Sur le plan technique, la différence entre ces deux versions se trouve sur la caméra, qui propose du Full HD en version Advanced et de la Ultra Haute Définition 4K sur la version Professional mais aussi sur le chargeur qui propose une charge jusqu'à deux fois plus rapide sur la version Professional. La nacelle stabilisée sur 3 axes et la caméra 4K permettent au DJI Phantom 3 Professional de faire des vidéos de qualité professionnelle.

Photo 6: DJI Phantom 3 Professional



Source : <http://www.studiosport.fr>

II.2.1.2. Principales fonctionnalités

- La caméra : La caméra embarquée du Phantom 3 Professional nous permet d'enregistrer des vidéos 4K à 30 images par seconde et de prendre des photos d'une résolution de 12 mégapixels pour un résultat ultra net et détaillé. On peut exporter la vidéo au format MOV ou MP4. Les modes de prise de vue de photos disponible incluent les modes Rafale, Continu et Accéléré. Cette caméra repose dans les deux cas sur un capteur Sony

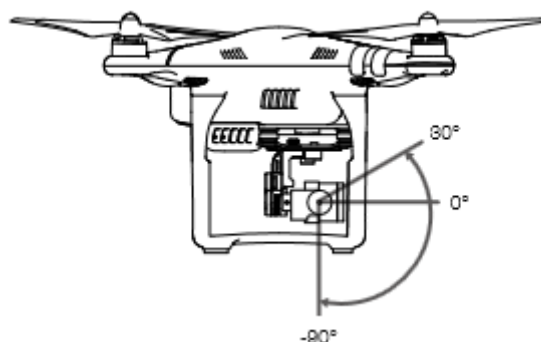
Exmor au format 1/2,3 pouce (celui des appareils photo compacts) de 12 millions de pixels, doté d'une lentille f/2,8 offrant un champ de vision de 94°, soit une focale fixe équivalente à 20 mm, pour éliminer presque toutes les distorsions optiques gênantes qui gâchent si souvent les enregistrements réalisés avec les caméras non conçues pour les prises de vue aériennes.

L'application DJI Pilot nous permet d'obtenir un aperçu en direct des éléments capturés par la caméra sur notre appareil mobile. Le capteur perfectionné améliore la netteté, diminue le bruit et nous permet de prendre de meilleures photos.

- Présentation de la nacelle

La nacelle à 3axes offre une plate-forme stable pour la fixation de la caméra, nous permettant ainsi de capturer des photos et vidéos sans tremblement. La nacelle peut incliner la caméra jusqu'à 120 degrés.

Figure 7: Illustration des 3 axes



Source : <http://www.dji.com/product/phantom-3>

- Liaison descendante vidéo HD : Liaison descendante HD à faible latence prise en charge par une version optimisée du système DJI Lightbridge.
- Intelligent Flight Battery DJI : L'intelligent Flight Battery de 4 480 mAh intègre de nouvelles cellules ainsi qu'un système de nouvelle gestion de l'autonomie. Cette Intelligent Flight Battery, mise à niveau, dispose de capteurs intégrés et d'indicateurs LED qui nous permettent de connaître l'état et la puissance restante de la batterie en temps réel. Le Phantom 3 Professional calcule en permanence la

distance qui le sépare de l'utilisateur et la quantité d'énergie nécessaire pour son retour, de sorte que nous sachions toujours combien de temps nous pouvons continuer à voler et lorsqu'il est temps de recharger la batterie. L'autonomie en vol peut atteindre 23 min. Le drone peut voler à un maximum de 16 m/s (un peu moins de 60 km/h) à l'horizontal, monter à 5 m/s et descendre à 3 m/s.

- Contrôleur de vol : le contrôleur de vol de nouvelle génération a été amélioré et propose désormais une expérience de vol plus fiable. Le nouvel enregistreur de vol enregistre les données importantes de chaque vol et de Vision Positioning System optimise la précision du vol stationnaire en intérieur ou dans les environnements permettant la réception d'un signal GPS. En effet, ce contrôleur de vol présente plusieurs améliorations importantes notamment un nouveau mode de vol. Deux modes de sécurités sont proposés : Sécurité et retour au point de départ. Ces fonctionnalités garantissent le retour de l'appareil en toute sécurité en cas de perte de signal de contrôle.
- Mode de vol : Trois modes de vol sont disponibles à savoir :
 - Mode P (positionnement) : le fonctionnement du mode P est optimal lorsque le signal GPS est fort. Il existe trois états différents pour le mode P (automatiquement sélectionné par le Phantom 3 Professional selon la force du GPS et des capteurs de Vision Positioning) :
 - ☞ P-GPS : le GPS et le Vision Positioning System sont tous les deux disponibles et l'appareil utilise le GPS pour le positionnement.
 - ☞ P-OPTI : le Vision Positioning System est disponible mais le signal GPS n'est pas assez puissant. L'appareil utilise uniquement le Vision Positioning System en vol stationnaire.
 - ☞ P-ATTI : ni le GPS, ni le Vision Positioning System ne sont disponibles. L'appareil n'utilise alors que son baromètre pour le positionnement. Seule l'altitude est contrôlée.
 - Mode A (altitude) : ni le GPS, ni le Vision Positioning System ne sont utilisés pour la stabilisation. L'appareil n'utilise donc que son baromètre pour se stabiliser. L'appareil peut automatiquement revenir au point de départ en

cas de perte du signal de la radiocommande si le point de départ est correctement enregistré.

- Mode F (fonction) : la fonction IOC (Intelligent Orientation Control) est activée avec ce mode. IOC permet aux utilisateurs de verrouiller l'orientation de l'appareil à l'aide de différents modes. Trois modes de fonctionnement sont possibles pour IOC et on peut sélectionner le mode IOC souhaité dans l'application DJI pilot. Il faut noter que, IOC fonctionne en mode F uniquement, et l'utilisateur doit mettre le commutateur de mode de vol en position 1 pour pouvoir activer la fonctionnalité IOC.

Tableau n°9: Tableau récapitulatif des trois modes de fonctionnement IOC

Course Lock (CL)	Une fois ce mode activé, le nez de l'appareil reste tourné vers l'avant quelle que soit la position de l'orientation de l'appareil. Pour désactiver le verrouillage, on doit réinitialiser l'appareil ou quitter le mode CL.
Home Lock (HL)*	Enregistrer un point de départ (Home Point, HP), et activer le mode HL. Les mouvements vers l'avant ou vers l'arrière éloignent ou rapprochent l'appareil du point de départ enregistré, quelle que soit son orientation et sa position.
Point Of Interest (POI)*	Point d'intérêt. Enregistrer un point d'intérêt. L'appareil peut faire des cercles autour du POI et le nez pointe toujours vers le POI.

Source : <http://www.dji.com/product/phantom-3>

Les fonctionnalités Home Lock (HL) et Point Of Interest (POI) seront bientôt disponibles.

- La radiocommande

La radiocommande du Phantom 3 Professional est un équipement de communication multifonction sans fil qui intègre le système de liaison descendante vidéo et le système de radiocommande de l'appareil. Elle est équipée d'un support pour

smartphone ou tablette. Les systèmes de liaison descendante vidéo et de radiocommande de l'appareil fonctionnent à une fréquence de 2,4 GHz. La radiocommande est dotée de plusieurs fonctions de caméra permettant notamment de prendre des photos et d'en afficher un aperçu, ou encore de contrôler les mouvements de la nacelle. La radiocommande est alimentée par une batterie rechargeable 2S. Le niveau de la batterie est affiché grâce à des voyants situés sur le panneau avant de la radiocommande.

Photo 7: La radiocommande



Source : <http://www.studiosport.fr>

II.3. Présentation du logiciel utilisé

II.3.1. Rappel

Le SIG ou GIS peut-être défini comme un ensemble organisé de matériels, de données géographiques, de personnel compétent (savoir-faire) et de toute procédure permettant la saisie, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et la visualisation des informations référencées spatialement grâce à la combinaison des informations géographiques et des bases de données.

Exemples de logiciel SIG : GEOCONCEPT, ARCGIS,...

II.3.2. Présentation de Pix4Dmapper [12]

Pix4D mapper est un logiciel de photogrammétrie permettant d'automatiser les processus de traitements photogrammétriques dans des temps très brefs.

Exemples de logiciel de photogrammétrie : Agisoft PhotoScan Pro, Recap 360, ...

Développé par Pix4D ([link is external](#)), le logiciel Pix4Dmapper ([link is external](#)) convertit les images aériennes nadirales et obliques en ortho mosaïques géoréférencées 2D et modèles 3D de surface, et de MNT obtenus à partir d'un vecteur aérien (drones, avions, etc.). Avec son avancée automatique aérotriangulation basée uniquement sur les techniques d'optimisation de contenu unique d'image, Pix4D offre jusqu'à une précision 3D du centimètre, dispose d'un flux de travail entièrement automatique. En plus de cela, il possède des fonctionnalités particulièrement intéressantes comme la sélection d'images pour la mosaïque permettant par exemple d'éliminer les objets en mouvement, la mesure de surfaces et de volumes à l'aide du rayCloud Editor ([link is external](#)) ou encore exporter les résultats dans n'importe quel logiciel professionnel GIS, CAD de photogrammétrie traditionnels ; dans différents formats (GeoTiff, Google Tiles, LAS, XYZ, etc.).

II.3.2.1. Utilisation du logiciel

➤ Traitement des images dans Pix4Dmapper

D'une manière simplifiée, les phases nécessaires au traitement d'images obtenues à partir d'un drone sont au nombre de trois. La première consiste à aligner les différentes images entre elles, la seconde à en extraire les informations pertinentes sous la forme d'un nuage de points ou d'un maillage et enfin vient l'étape de reconstruction et d'export du GeoTiff ou du MNT. Détaillons chacune d'entre elles.

- Alignement d'images

Contrairement aux techniques d'acquisition classiques par capteurs sophistiqués, les drones utilisent pour la plupart les mêmes appareils photo que l'on peut trouver dans le commerce. L'altitude de vol et l'angle de prise de vues nécessitent l'acquisition de plusieurs images se chevauchant afin de couvrir une zone.

Il sera alors nécessaire d'aligner (ou autrement dit de fusionner) ces différentes prises de vue afin d'obtenir une seule image continue. Pour cela, différentes techniques existent, mais globalement l'idée est de rechercher les entités correspondantes (keypoints) entre les différentes photos afin de construire l'image finale. Le code couleur utilisé permet d'identifier rapidement les images dont l'alignement n'a pu être réalisé

pour cause de mauvaise calibration du capteur ou de mauvais paramétrage de la mission :

- ☞ Un rond bleu correspond à la position initiale de l'image obtenue à partir des coordonnées GPS initiales
- ☞ Un rond vert est la position optimisée de l'image calculée par Pix4D Mapper prenant en compte le système de coordonnées géographiques de référence des points de calage
- ☞ Un rond rouge correspond à une caméra non calibrée et elle ne peut donc être utilisée

Le résultat de cette opération nous a permis de voir qu'un grand nombre d'images n'ont pu être alignées du fait d'une erreur de paramétrage lors de la mission. Mais sachons que la nouvelle version de Pix4D permet de spécifier manuellement des points de correspondance afin d'améliorer le résultat final.

- Génération du nuage de points

Une fois les images correctement calibrées, il est possible d'en extraire des points contenant différentes informations comme notamment la couleur de celui-ci, mais aussi sa position en 3 dimensions (X, Y et Z) grâce à la stéréoscopie. Ce processus va alors générer un ensemble de ces points plus communément appelé "nuage de points". Ce sont ces derniers qui seront utilisés lors de la création de l'orthophotographie et du MNT.

- Export du résultat

Nous arrivons au bout de ce processus. Aucune difficulté technique à cette étape, il suffit de spécifier le format d'export désiré et au bout de quelques minutes on obtient le fichier désiré. Plusieurs options sont disponibles comme notamment un classique fichier GeoTiff ou un MNT mais aussi la génération de tuiles à "la Google" pour une diffusion web.

- Les petits (gros) plus de Pix4D Mapper

Si on est dans le domaine, on va dire que les fonctionnalités précédemment présentées ne sont pas différentes de celles que l'on retrouve dans les autres logiciels

similaires tels que PhotoScan ([link is external](#)). Sur ce point on a tout à fait raison. Mais, Pix4Dmapper ([link is external](#)) possède d'autres options qui font sa particularité. Si les deux premières sont assez courantes, les deux dernières sont spécifiques à Pix4Dmapper ([link is external](#)) ce qui lui donne son caractère unique.

- Mesure de distances, surface et volumes

Au cas où on a réalisé la prise de vue d'une carrière, à partir du nuage de points, il sera alors possible de calculer la volumétrie d'un monticule de pierres, communément appelé "stockpile" dans le domaine. Pour cela, rien de plus simple, on dessine sur l'interface 3D la zone désirée et une fois la précision améliorée en remplaçant les points sur les images de référence 2D, la volumétrie est calculée automatiquement.

- Export 3D

Bien que cette fonctionnalité soit disponible dans Pix4Dmapper ([link is external](#)), celle-ci est encore en mode bêta contrairement à PhotoScan ([link is external](#)) qui la propose depuis longtemps. Bien qu'intéressante pour certaines applications, celle-ci est moins importante dans notre domaine car cet export s'accompagne d'une perte de la composante spatiale. En résultat, on aura une belle représentation 3D mais celle-ci restera simplement visuelle.

- Création d'objet 3D pour le DAO

Via l'interface de Pix4Dmapper ([link is external](#)) on va pouvoir très précisément dessiner les objets contenus dans l'image (ex: un poteau électrique) afin de générer ensuite un fichier compatible avec un logiciel de DAO (ex: autodesk). Entre l'orthophoto, le modèle numérique de terrain et ces objets vectoriels 3D, on obtient alors une représentation fidèle de notre territoire.

- Choix de l'image

C'est l'une des fonctionnalités qui rend **Pix4Dmapper** ([link is external](#)), complètement unique dans le domaine. Pour illustrer l'intérêt de celle-ci, supposons que l'on a pris des images au-dessus de routes. Entre les différentes prises de vue, des objets mobiles (voitures, moto, etc.) se seront déplacés. En utilisant l'éditeur de mosaïque on

peut alors sélectionner les images sans véhicules afin de les utiliser lors de la génération de l'orthophoto et obtenir ainsi une image sans véhicule ou autre artefact. Certes, cela demande un gros travail manuel, mais il faut avouer que le résultat final est irréprochable.

- Conclusion

Ainsi s'achève ce billet, qui on espère qu'on vous aura convaincu des potentialités des drones et de la maturité des technologies associées. Nous nous sommes essentiellement concentrés sur l'utilisation de **Pix4Dmapper** ([link is external](#)) qui est certainement à l'heure actuelle la solution la plus aboutie et facile à prendre en main. Nous sommes volontairement restés très général, mais sachons que Pix4Dmapper ([link is external](#)) recèle de fonctionnalités qui n'ont pas été abordées comme le calcul de l'index de végétation (NDVI), les courbes de niveau ou encore la définition de masques au sein des images.

II.3.2.2. Configuration requise [13]

Pour utiliser Pix4Dmapper sur un PC sous Windows, on doit disposer de la configuration minimale suivante :

Minimum:

- Windows 7, 8, 10, Serveur 2008, Serveur 2012, 64 bits (PC ou Mac ordinateur employant Boot Camp).
- Quelques CPU (Intel i5/ i7/ Xeon recommandé).
- Quelques GPU qui sont compatibles avec OpenGL 3.2. (Carte graphique intégrée Intel HD 4000 ou surintégrée).
- Petit projet (en dessous de 100 images à 14 MP): 4 GB RAM, 10 GB HDD Espace Libre.
- Moyen projet (entre 100 et 500 images à 14 MP): 8 GB RAM, 20 GB HDD Espace Libre.
- Grand projet (à partir de 500 et 2000 images à 14 MP): 16 GB RAM, 40 GB HDD Espace Libre.

- Très grand projet (au-delà de 2000 images à 14 MP): 16 GB RAM, 80 GB HDD Espace Libre.

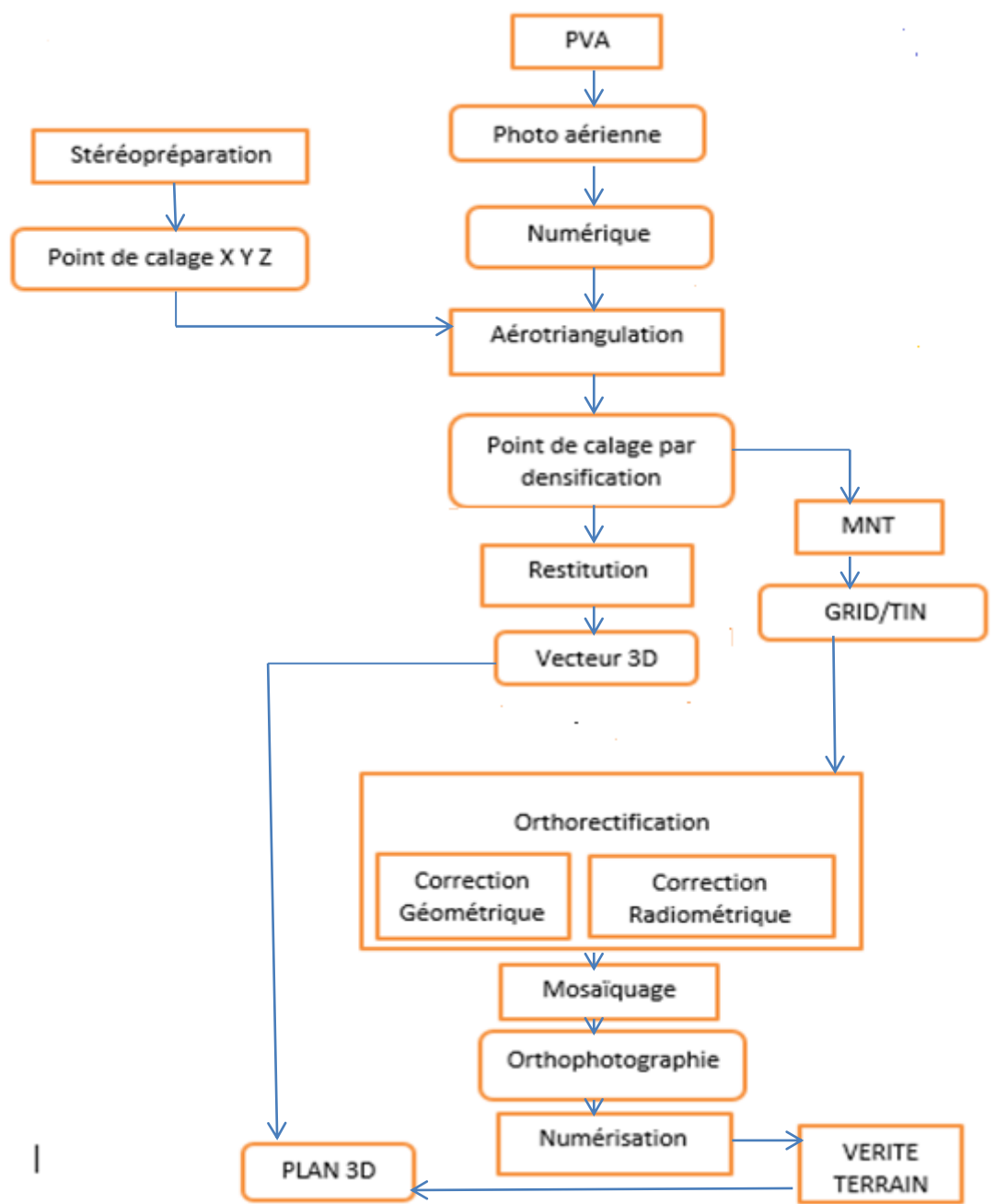
Recommandé:

- Windows 7, 8, 10, 64 bits.
- CPU quad-core ou hexa-core Intel i7/Xeon.
- GeForce GPU compatible avec OpenGL 3.2 et 2 GB RAM.
- Disque dur: SSD.
- Petit projet (en dessous de 100 images à 14 MP): 8 GB RAM, 15 GB SSD Espace Libre.
- Moyen projet (entre 100 et 500 images à 14 MP): 16GB RAM, 30 GB SSD Espace Libre.
- Grand projet (à partir de 500 images à 14 MP): 32 GB RAM, 60 GB SSD Espace Libre.
- Très grand projet (au-delà de 2000 images à 14 MP): 32 GB RAM, 120 GB SSD Espace Libre.

III. Processus de production d'un plan topographique ou d'une image à partir d'un drone

III.1. La chaîne de production du plan/image

Organigramme 2: Processus d'établissement du plan/image



Source : Cours Photogrammétrie, année 2011

III.2. Les travaux à effectuer

III.2.1. La préparation de la mission de PVA

Dans tous travaux, la préparation doit tenir une grande importance pour que le projet se déroule normalement.

Pour une mission de PVA, il faudra faire un inventaire complet de tous nécessaire à la PVA.

- Documentation :
 - ☞ Carte ou plan topographique de la zone
 - ☞ Ancien tableau d'assemblage de la zone/orthophoto
- Préparation administrative :
 - ☞ Droit de survol de la zone
 - ☞ Ordre de mission
 - ☞ Diverse
- Préparation des matériels :
 - ☞ Caméra en bonne état
 - ☞ Drone (avion) en état de vol
- Préparation de fourniture (approvisionnement) :
 - ☞ Bobine de film (pour photo argentique)
 - ☞ Produit chimique (rebélateur, fixateur : pour les anciennes méthodes)
 - ☞ Batterie de recharge

III.2.2. La mission de la Prise de Vue Aérienne

Elle est en fonction des demandes du client et à l'évaluation de l'objet de la prise de vue elle-même, tels par exemple : le chantier de forme linéaire ou surfacique, les précisions et/ou les résolutions des images, la configuration du terrain, secteurs urbains ou ruraux, etc. Nous choisirons l'échelle la plus adaptée à la prise de vue aérienne, le recouvrement longitudinal et le recouvrement latéral, la hauteur de vol, ainsi que la focale de la caméra.

➤ Préparation du plan de vol

Actuellement presque tous les pays disposent d'une couverture cartographique à une échelle donnée. Exemple pour Madagascar, il est couvert à 99% d'une carte à 1 :100 000.

La préparation du plan de vol consiste à tracer les lignes de vol qui seront suivies lors de l'exécution de la prise de vue. On trace ces lignes sur une carte au 1 :100 000 ou sur une orthophoto qui sera comme moyen de navigation.

On commence en générale par fixer l'échelle de la couverture pour un certain niveau de référence et on en déduit la hauteur du sol.

N.B : Le recouvrement doit être suffisant pour l'altitude la plus haute du terrain.

L'établissement du plan de vol demande de renseigner la hauteur et la vitesse de vol, la distance entre deux lignes de vol et entre deux clichés, l'inclinaison de la caméra pour s'assurer d'un recouvrement suffisant.

Le vol a été réalisé selon les paramètres suivants :

- Hauteur de vol : 150m
- Taille de l'image au sol : 105×88m
- Taille du pixel au sol : 5cm
- 12bandes de vol
- Recouvrement longitudinal et latéral : 70%

Calcul des nombres de bandes et des photos

Largeur de la zone : 370m

Longueur de la zone : 552m

Calcul du nombre de lignes de vol

$$1-70\%=30\%$$

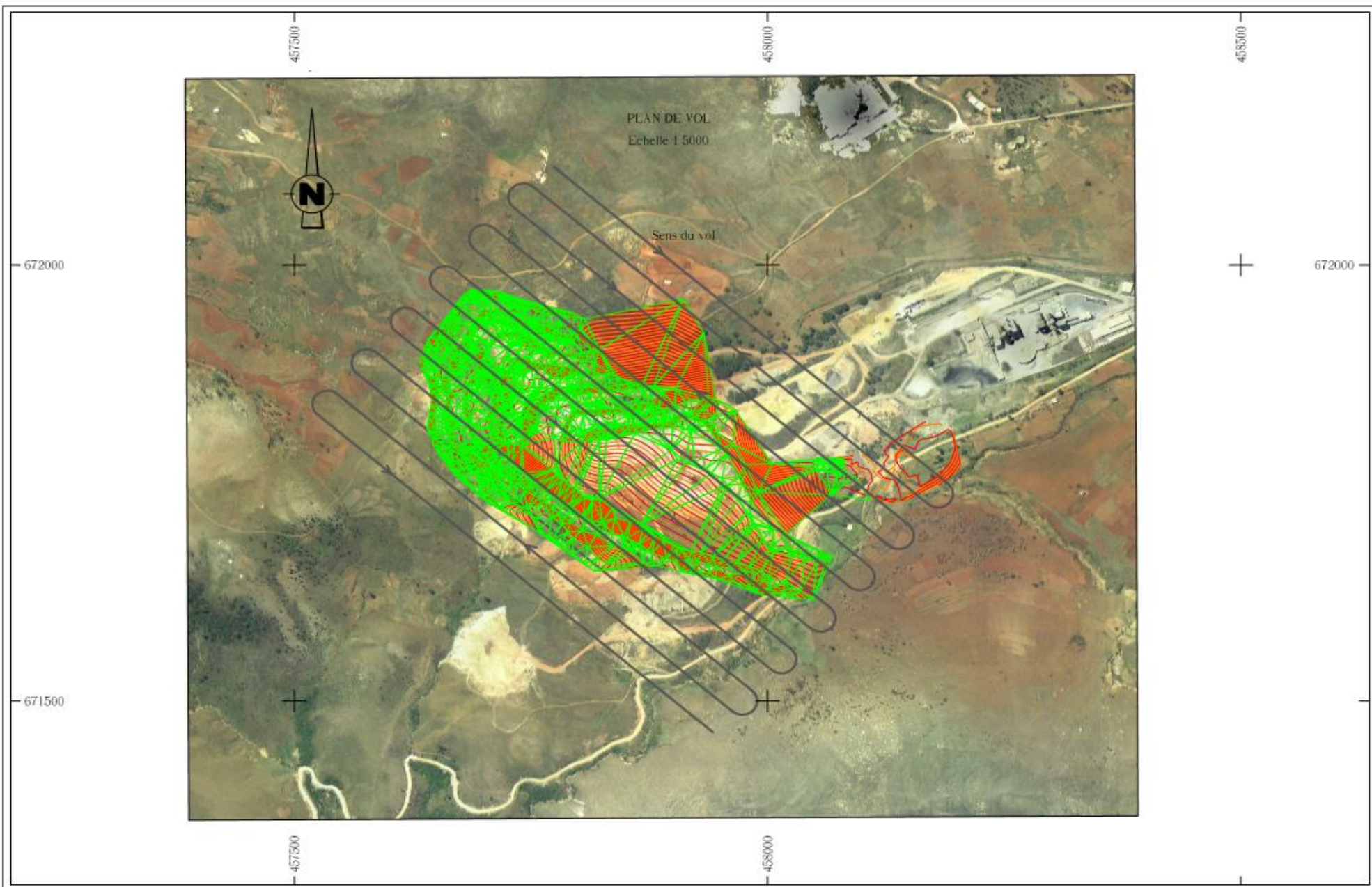
$$30\%\times 105=31,5$$

$$370/31,5=12 \text{ lignes de vol}$$

$$30\%\times 88=26,4$$

$$552/26,4=21 \text{ couples}$$

Nombre de couples+1= nombre de photos dans une bande



Donc on a 22 photos dans une bande

Nombre total de photos = nombre de photos dans une bande \times nombre de lignes de vol. On a donc récolté 264 photos au cours des vols.

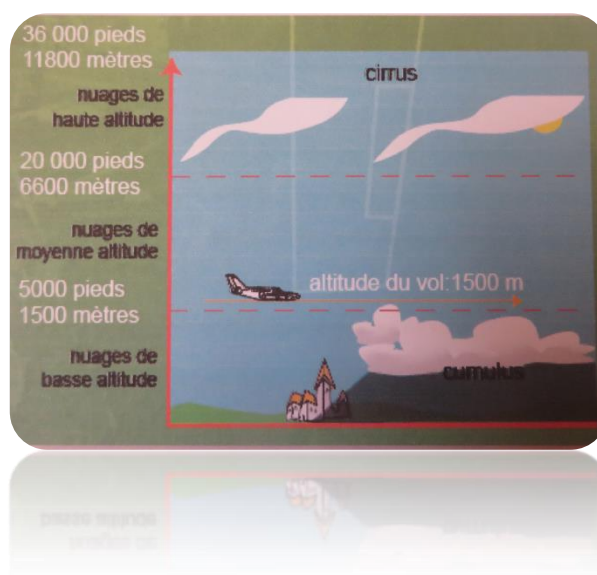
Dans le cas de la carrière de l'Ibity, on a donc opéré 3 vols de drones d'une durée moyenne de 20 minutes pour chaque vol à partir de trois lieux de décollage différents afin de lever l'intégralité du site. Au cours de ces vols, une photo du site a été prise toutes les 5 secondes afin d'obtenir un recouvrement important (70% en transversal et en longitudinal), permettant ainsi à tout point de la scène d'être visible sur plusieurs images. Le recouvrement est une technique qui permet de reconstituer un modèle 3D de la carrière par stéréoscopie.

N.B : Grâce au vol automatisé, l'aéronef survolera la surface à explorer de manière systématisée et en la quadrillant complètement. Un pourcentage de recouvrement entre les clichés permettra de faire ressortir les reliefs, à la manière de la vision stéréoscopique humaine.

III.2.3. Les conditions physiques de la prise de vue aérienne [14]

III.2.3.1. Les conditions atmosphériques

L'obtention d'une image (orthophotographie) se fait à partir des clichés originaux, corrigés du point de vue géométrique. Concernant la qualité de ce type de travaux, il est nécessaire de disposer des clichés de qualité photographique élevée. Alors que la qualité de photos dépend fortement de la condition atmosphérique. Tels les nuages ; ces derniers se caractérisent par leur morphologie : il existe des nuages de haute altitude, de moyenne altitude, de basse altitude et enfin ceux de grande envergure. Le temps idéal pour effectuer une prise de vue aérienne devrait être sans nuages alors qu'il convient de noter que les jours d'ensoleillement sans nuage sont très rares. Cependant, les cirrus ⁽¹⁾ peuvent s'avérer très utiles car ils permettent un éclairage diffus, et atténuent les ombres fortes.

Figure 8: Morphologie des nuages [14]

Les autres contraintes atmosphériques peuvent être causées par la condensation⁽²⁾, l'humidité de l'air, et en zone urbaine la pollution, et le trop ensoleillement pouvant générer des reflets spéculaires, sur les zones d'eau ou les surfaces claires. Il faut aussi tenir compte de la vitesse du vent et de la turbulence de l'air puisque sous l'action du vent, le drone (avion) dérive c'est-à-dire que son axe fait un certain angle avec la direction de sa route réelle. Donc, la vitesse du vent doit être assez faible pour la stabilité du drone (avion) et la régularité du vol. Il est aussi souhaitable que le sol soit visible et pointable, c'est-à-dire un sol nu sans végétation (notre cas) pour bien distinguer les diguettes ou limites identifiables sous stéréoscope.

⁽¹⁾ Nuages de haute altitude ; ⁽²⁾ Rosée, brouillard

III.2.3.2. Les heures de vol

L'heure du jour a une influence significative sur les couleurs, les tonalités et la texture, mais aussi sur la taille des ombres portées. Il en est de même pour la saison, mais elle conditionne en même temps l'état de la végétation.

Le choix de l'heure et de la saison doit donc se faire en rapport avec l'utilisation que l'on va faire des images aériennes, l'idéal serait bien sûr de prendre des photos quand le soleil est au zénith c'est-à-dire à 90°. Cela permettrait de limiter les ombres portées. Mais de telles conditions optimales ne peuvent se trouver qu'autour de l'équateur. Pour limiter l'étendue des ombres portées, on s'impose la contrainte d'effectuer des prises de vue avec un angle solaire minimum de 30°. Le soleil brille et à une hauteur minimale de 30° à l'horizon ce qui donne une période entre 9h et 15h.

Figure 9: Illustration des heures de vol [14]



III.2.3.3. L'échelle de la prise de vue et la hauteur du vol

- L'échelle de la photographie aérienne

L'échelle de la photographie est en fonction de la focale de prise de vue et de la hauteur du vol ; dans le cas d'un terrain plan et horizontal, on peut déterminer en toute rigueur l'échelle de la photographie aérienne.

$$\text{Echelle de la prise de vue} = \frac{\text{Focale de prise de vue}}{\text{Hauteur de vol}} \quad (10)$$

Or, naturellement on a souvent des terrains accidentés ; pour un terrain présentant du relief, elle varie d'un point à un autre de la même photographie, et la surface couverte est d'autant plus faible que l'altitude du terrain est plus grande. Par

conséquent, pour obtenir les recouvrements indispensables, il convient de calculer les intervalles entre les prises de vue et les distances entre les bandes consécutives pour les régions les plus élevées du terrain.

Enfin, le relief est à l'origine de diverses perturbations : variation d'échelle due aux effets de pente, zones masquées et déformations non homogènes dans l'image, délocalisation plus ou moins importante des objets dans l'image suivant la dénivelée et l'incidence de visée (parallaxe).

L'échelle sera le rapport d'une longueur de l'image d'un petit segment horizontal du terrain à la vraie longueur de ce segment.

$$\text{Echelle de la prise de vue} = \frac{\text{Focale de prise de vue}}{\text{Hauteur de vol} - H_0} \quad (11)$$

Tableau 12: Echelle de la prise de vue

E_{PVA}	5000	10 000	20 000	25 000
ξ_h (cm)	25	40/50	70	80

Source : Cours Photogrammétrie, année 2011

Avec ξ_h : Précision altimétrique

E_{PVA} : Echelle de la PVA

- La hauteur du vol

Généralement, l'opérateur calcule la hauteur de vol correspondant à une échelle désirée.

L'altitude de vol est donc : (12)

$$\text{Focale} \times \text{Echelle} = \text{Hauteur de vol}$$

Pour une surface plus petite, l'altitude de vol est petite ; tandis que lorsqu'il s'agit d'une surface vaste, l'altitude de vol est grande. On fait varier l'altitude de vol H car pour un appareil donné, la focale est constante.

Exemple :

$$103 \times 15000 = 1\,545\,000 \text{ mm soit } 1545\text{m}$$

$$155 \times 15000 = 2\,325\,000 \text{ mm soit } 2325\text{m}$$

- Les recouvrements

Les photographies aériennes sont en général obtenues par des prises de vues en série avec un recouvrement longitudinal d'environ 60% et transversal compris entre 15% et 25 % de façon à pouvoir confectionner, à l'aide de deux photos aériennes une image tridimensionnelle de la surface photographiée. L'observation d'éléments de terrain comme les talus et les édifices en hauteur, permet d'avoir une impression particulière évocatrice. Ces recouvrements doivent être signalés dans le cahier de charge.

- Le sens du vol

En principe, le sens du relief est le sens de base. Il doit être parallèle à l'obstacle. L'orientation la plus employée est le « Nord-Sud ».

III.2.3.4. Les difficultés techniques

Quelques-unes des difficultés techniques sont les suivantes :

- La limite de perception de l'œil humain

L'acuité visuelle est l'aptitude de l'œil à séparer les plus petits détails possibles. Dans les meilleures conditions d'observation de clichés, l'acuité monoculaire est l'ordre de $g = 4\text{cgon}$; elle est environ cinq fois plus petite en vision stéréoscopique, soit de l'ordre de 8mgon , jusqu'à 3mgon dans des conditions excellentes. L'écartement moyen des yeux humains étant de $e = 65\text{mm}$, cette acuité permet de détecter une différence de parallaxe jusqu'à une distance D telle que :

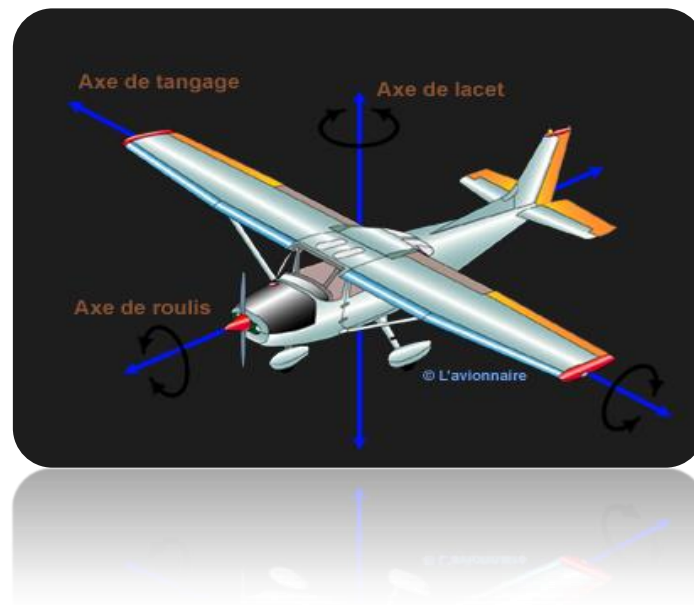
$$e = D \times 3 \times 10^{-3} \times \frac{\pi}{200} \quad (13)$$

On en déduit que $D_{\text{max}} = 1\,400\text{m}$. Ceci implique que, dans un avion volant à plus de $1\,500\text{m}$ d'altitude, la perception du relief ne s'effectue plus en vision stéréoscopique mais uniquement grâce aux éléments monoculaires de la perception de la profondeur.

➤ Les effets de dérive, de tangage et de roulis :

Dans les airs, la prise de photos est optimale quand le drone (avion) est parfaitement stabilisé. Cependant, c'est rarement le cas : les turbulences sont nombreuses, le drone (avion) est confronté perpétuellement à différents types de pression tels le roulis ⁽³⁾, le tangage ⁽⁴⁾ et le lacet ⁽⁵⁾. Le système inertiel embarqué permet à chaque cliché d'être orienté, ce qui contribue à faciliter sa rectification.

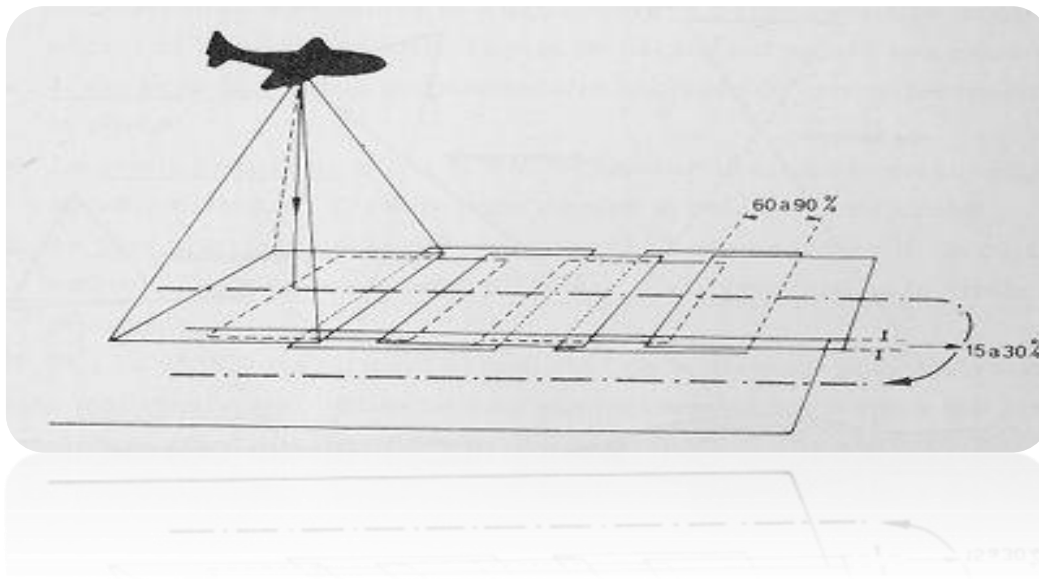
Figure 10 : Roulis, tangage et lacet [15]



III.3. La prise de vue aérienne ou P.V.A

Les photos aériennes offrent une représentation du terrain très proche de la réalité, sans perte d'information occasionnée par la généralisation ou le codage de paramètres précis, c'est-à-dire que l'objet représenté n'est pas présélectionné. Ainsi, cette technique est pour ceux qui interprètent ces photos aériennes, plus exigeantes que la technique des cartes. Une formation spéciale et des connaissances préalables sont indispensables pour « extraire » les données simplement à partir de la photo aérienne. Chaque thématique à traiter doit d'abord être identifiée par l'intermédiaire d'une analyse photographique précise. Une expérience de plusieurs années en matière d'interprétation permet cependant de documenter et d'analyser très précisément l'environnement.

⁽³⁾ Oscillation autour de l'axe de l'équilibre, ⁽⁴⁾ mouvement d'un corps autour d'un axe perpendiculaire, ⁽⁵⁾ Oscillation d'un corps en mouvement par rapport à son centre de gravité

Figure 11 : Prise de vue photogrammétrique [16]

III.3.1. Les images fournies par les photos aériennes

En général, on a l'habitude de les diversifier en trois catégories, en fonction de l'inclinaison de l'appareil de prise de vue :

- Photos verticales
- Photos horizontales
- Photos obliques hautes ou panoramiques

Pour la production des orthophotos, on utilise surtout des photographies verticales. L'inclinaison par rapport à la verticale de l'axe de prise de vue est involontaire ou accidentelle et le cas fréquent, il s'agit d'une erreur accidentelle qui est due au mauvais calage de la chambre sur l'avion, au tangage et au roulis.

III.3.2. La stéréopréparation [17]

III.3.2.1. Définition

La stéréopréparation est un ensemble des opérations qui ont pour but la détermination directe sur le terrain de tous les éléments nécessaires. En effet, l'opération de calage des clichés nécessite la présence de six points d'appui en (X, Y, Z) par photographie. Il est très rare de pouvoir observer six points connus sur une photographie. Cela nécessite donc des opérations topographiques au sol avant les prises de vue.

III.3.2.2. Objectif

L'objectif de la stéréopréparation est donc de déterminer les points de calage nécessaires aux photos, tant planimétrique qu'altimétrique, permettant d'avoir une restitution exacte des photos et une bonne verticalité du MNT. Un levé direct par GPS différentiel si possible, est plus précis par rapport à d'autres méthodes de levé classique.

III.3.2.3. Le principe de prébalisage

Son principe consiste à déposer au sol des plaques visibles depuis le drone (l'avion) : leur taille est en fonction de l'échelle de la prise de vue, de l'ordre de 30cm×30cm, on en détermine les coordonnées par des méthodes topométriques classiques telles : (la triangulation, l'intersection, le relèvement, le recoupement, le rayonnement, le cheminement, le GPS, etc.). A petite échelle, on peut accepter l'altitude Z. Mais par contre, à grande échelle on a recours à des nivellements due aux déplacements (rotation, translation, homothétie).

III.3.2.4. Les points d'appui

C'est la matérialisation et l'identification des points de calage au sol, nécessaires au traitement ultérieur des clichés. Une centaine de points, dont la plupart sont déjà connus en X, Y, Z. Les points d'appui doivent toujours être rattachés par des points géodésiques (points connus) ou des repères de nivellements afin d'assurer leur homogénéité.

- Le choix des points d'appui

Lorsqu'il s'agit des points stéréopréparés (de calage), les méthodes à adopter doivent être choisies au bureau, à priori. Telles, l'intersection, le cheminement fermé, le rayonnement, le GPS, etc.

La zone doit toujours être encadrée par des points ; les distances entre les points d'appui doivent être homogènes c'est-à-dire à peu près égales. Ces points doivent être matérialisés de façon durable pour assurer la pérennité ; éviter tant que possible le placement des points sur l'axe ou au bord de la route. L'opérateur doit vérifier l'existence des points anciens et s'assurer qu'ils n'ont pas bougés ; on fait un choix des points stationnables, exploitables et précis ; ils doivent être aussi visibles, permanents et identifiables sur terrain et sur photo puisqu'on va les piquer.

A grande échelle, il est nécessaire de faire une descente sur terrain pour le prébalisage c'est-à-dire de poser des points avant la prise de vue aérienne ;
Chaque point doit être numéroté.

- Quelques difficultés

L'emplacement de ces points est en fonction de la précision. Pour différentes raisons, dû à la recherche d'une précision, il se peut qu'on ne puisse pas stationner la borne, dans ce cas on stationne sur un point excentré à laquelle on n'a pas besoin de connaître ses coordonnées. Ces points sont placés sur un édifice, un clocher d'église par exemple, ou au sommet d'un pylône. Si on a que les coordonnées d'un clocher, on stationne un point de la cour où l'on peut voir le point à viser. Dans ce cas, on parle d'un « rattachement du clocher ».

La correction est calculée à partir de la formule suivante :

$$C = \frac{r \times \sin(l-l_0)}{D \times \sin 0,0001} \quad (14)$$

C : correction en seconde centésimale ;

r : déplacement en mètre ;

D : distance entre la station et le point visé, en mètre

- La précision planimétrique des points d'appui

La précision est calculée par la formule suivante :

$$\xi (m) = \frac{E}{1000} * \frac{2}{10} \quad (15)$$

Avec E : échelle du levé

Exemple : $E = \frac{1}{20000}$

$$\xi(m) = \frac{20000}{1000} * \frac{2}{10} = 4m$$

III.3.3. La résolution

Dans le cas d'une **prise de vue numérique**, la résolution⁽⁷⁾ est étendue comme la possibilité de différencier des objets sur l'image. Elle s'apprécie en pixels. Cette caractéristique est très variable selon le type de donnée maillée. Elle sera dépendante du contraste entre deux objets limitrophes, et de leur forme : on peut voir une image à maille au sol de 0,50m la signalisation horizontale sur une route, alors qu'elle a une largeur bien inférieure à la maille. A l'inverse, la frontière entre deux objets ne présentant qu'un faible contraste, et aux limites non régulières, ne pourra être déterminée qu'avec au moins deux mailles.

Tableau 13: Résolution

Echelle de P.V.A	Echelle Orthophoto	Précision
1/50 000	1/25 000	50μ=508 Dpi
1/5000	1/2500	25μ

Source : F.T.M

III.3.4. Le pixel

Le pixel est l'unité minimale adressable par le contrôleur vidéo. Ne doit pas être confondu avec point (unité). A chaque pixel est associée une couleur, usuellement décomposée en trois composantes primaires. Sur un écran cathodique classique, chaque pixel est reconstitué par une triade de composants électroluminescents, rendant des tons rouge, vert et bleu une fois bombardés par le canon à électron du tube cathodique.

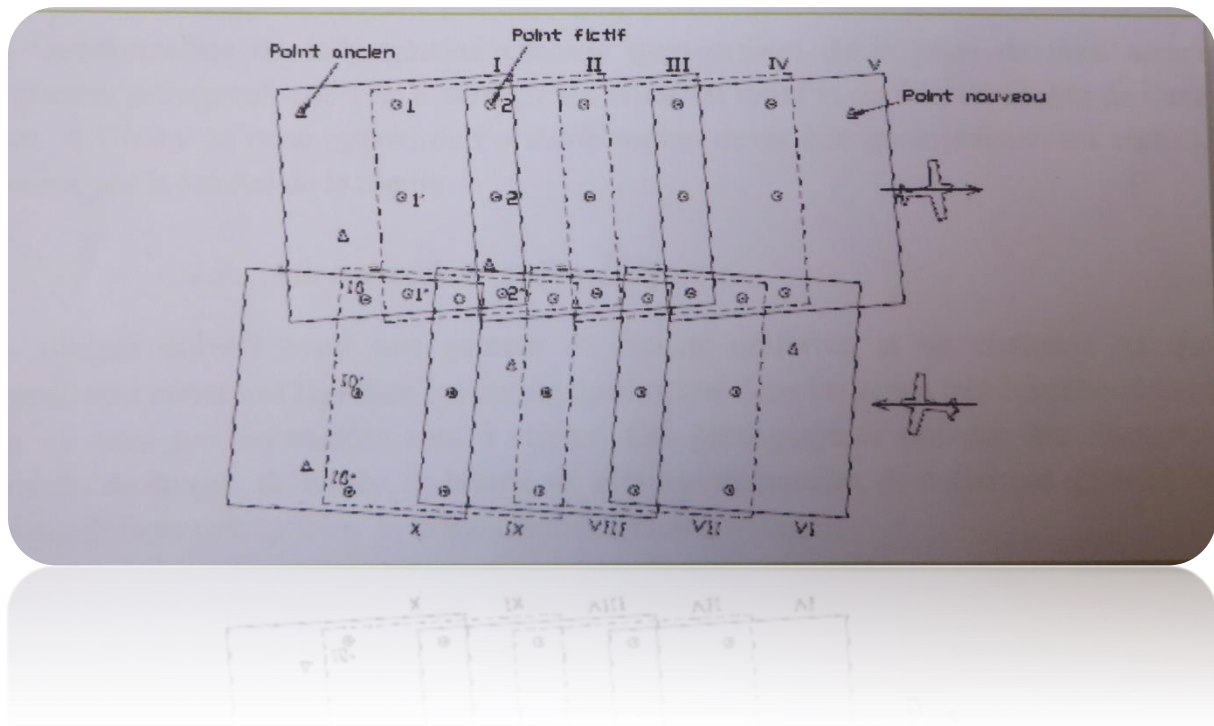
⁽⁷⁾ taille ou dimension d'un pixel

III.3.5. L'aérotriangulation

C'est la méthode de la détermination des coordonnées des points. En fait, la mise en place des photos et/ ou couple dans le restituteur nécessite la détermination d'au moins six points par couple. Mais acquérir ces points sur terrain serait trop cher et demande beaucoup de temps, c'est pour cela que l'aérotriangulation se classe comme étant une procédure photogrammétrique de densification des points de calage ou points stéréopréparés.

Les photos ainsi obtenues présentent des déformations ne permettant pas une superposition avec une carte. Il est donc nécessaire de corriger ces erreurs (dus notamment à l'inclinaison de la caméra, relief, courbure de la terre, défaut du film ou de la météo, ...) pour obtenir une photo dont l'échelle est constante en tous points. La connaissance précise des points en altitude Z permet alors de réaliser des corrections géométriques. C'est pour ces raisons qu'il est nécessaire d'utiliser un M.N.T.

Figure 12: Canevas d'aérotriangulation [14]

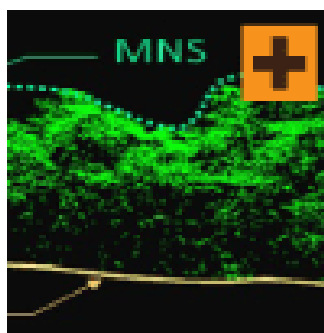


➤ Les corrections géométriques des photos numériques:

Pour corriger les erreurs de prise de vue, les photographies numériques subissent trois opérations :

- ☞ Calcul de leur orientation dans l'espace pour prendre en compte des déformations introduites par la distorsion de l'appareil photo, l'inclinaison lors de la prise de vue, et lors de la numérisation ;
 - ☞ Calcul du relief grâce au M.N.T ;
 - ☞ Puis orthorectification des images afin de corriger les erreurs inhérentes au relief.
- Différence entre un Modèle Numérique d'Elévation et un Modèle Numérique du Terrain [18]
- MNT (*DTM*) : un **Modèle Numérique de Terrain** (*Digital Terrain Model*) se rapporte à l'élévation du terrain lui-même. Le MNT ne prend pas en compte la hauteur des bâtiments ni celles des arbres.
 - MNE (*DEM*) : un **Modèle Numérique d'Elévation** (*Digital Elevation Model*) connu aussi sous le nom de **Modèle Numérique de Surface** prend en compte le relief, mais aussi ce qu'on appelle la "canopée" (sommets des arbres) ou encore le sursol (élévation des bâtiments). Comme le MNT, ce fichier numérique contient les données d'altitude d'un territoire, sous forme de semis de points irrégulier, de grille de points à maille carrée ou triangulée. La classification semi-automatisée du nuage de points bruts en différentes catégories (sol, végétation, bâtiment, route, eau,...) permet la réalisation du MNS.

Photo 8 : Modèle Numérique de Surface et Modèle Numérique de Terrain [18]



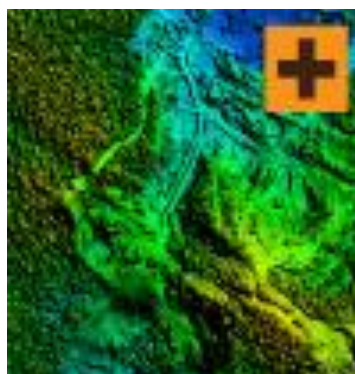
N.B : Par défaut les images aériennes ou satellites débouchent par photo-interprétation sur la production d'un MNE. Il faut des traitements plus poussés pour en extraire un MNT.

Usages du MNS

- **Gestion forestière** : le produit MNS permet de caractériser précisément la surface de la canopée. De plus, en connaissant le MNT, on peut en déduire un modèle numérique de la

canopée (MNC=MNS-MNT). Des caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers et des volumes de biomasse peuvent alors être calculés. Plus que jamais, ces outils deviennent une référence pour les gestionnaires des milieux naturels et professionnels de l'agroforesterie.

Photo 9 : MNS-carrière [18]



- **Urbanisme** : le MNS sert également à repérer distinctement les formes anthropiques d'un site. La restitution du modèle de l'enveloppe urbaine est nécessaire aux aménageurs des collectivités territoriales dans le but d'analyser le tissu existant et de prévoir les évolutions en terme d'aménagement (exemples : projets routiers, aménagement de grande ampleur ...).
- **Télécommunications** : le MNS peut aussi servir aux gestionnaires des réseaux aériens (pylônes électriques, antennes...). Par un repérage des obstacles physiques ou de visibilité, le MNS est un outil adapté pour prévoir les aménagements nécessaires au développement des réseaux futurs.

Usages du MNT

- **Topographie** : le MNT sert principalement à représenter les formes topographiques d'un site. La schématisation 3D de la surface du sol, sans construction ni végétation, aboutit à la création d'un référentiel topographique très précis.
- **Hydrologie** : le MNT est un outil fiable permettant la compréhension des formes et mouvements hydrologiques. Il permet le repérage des cours d'eau, des zones humides, talwegs, fossés...etc. De plus, ce modèle est utile pour l'élaboration de Plan de Prévention des Risques Inondations (PPRI), il permet de détecter les bassins versants et la direction des écoulements, de réaliser une modélisation hydraulique et de créer une simulation des inondations.
- **Géologie** : le MNT sert également à la caractérisation des zones géologiques à ciel ouvert telles que les carrières, les zones minières et aurifères...etc. L'analyse des données

topographiques permet aux exploitants de calculer les volumes d'extraction (Évaluation précise des cubatures) et de prévoir l'aménagement futur de ces zones (définition diable des bassins versants et réhabilitation des sites après exploitation).

- **Archéologie** : Le MNT permet de mettre en évidence les microreliefs liés aux activités humaines anciennes (anciens chemins, murets, restes de bâtiments...).

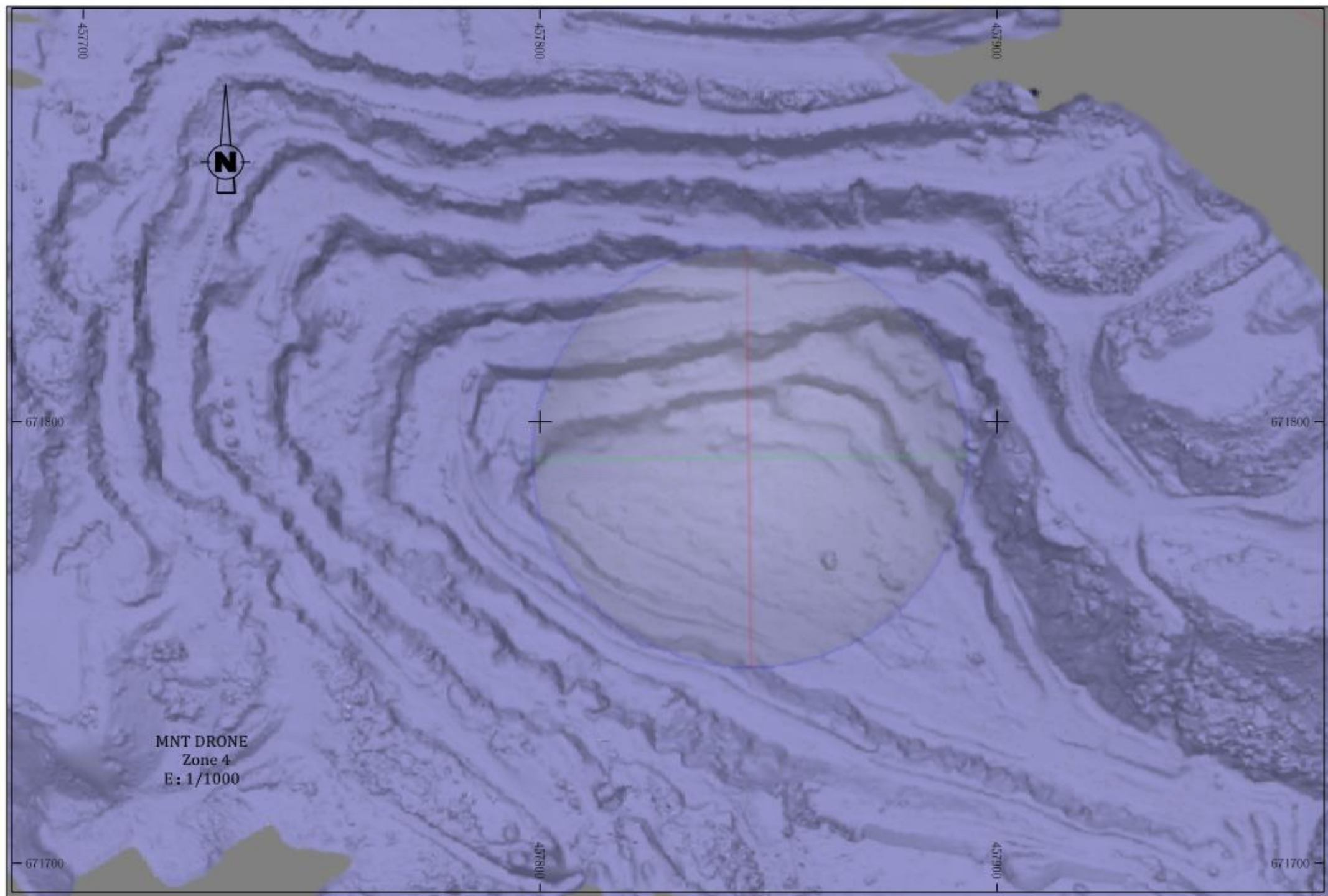
III.3.6. Modèle Numérique du Terrain (MNT)

Traditionnellement en topographie, le modèle d'un terrain est dressé à partir de points caractéristiques remarquables (points hauts, points bas, lignes de ruptures de pentes, ...). Ces points calculés en XYZ, vont composer un semis de points qui correspondront aux sommets des triangles suivant lesquels les interpolations en altitude seront calculées. L'ensemble de ces triangles (ou triangulation) constituera des faces trois dimensions et déterminera de manière numérique un modèle de terrain. Le MNT est aussi défini comme un ensemble de données, constitué d'un maillage de points et d'éléments linéaires donnant l'information altimétrique du terrain. Son calcul est automatique avec des logiciels spécifiés. Dans le cas contraire, il s'obtient par numérisation des courbes de niveau existantes. Il peut être employé pour diverses applications, et il est nécessaire à la réalisation d'orthophoto.

Pour Madagascar, on dispose déjà des MNT avec des pas de 25m ⁽⁸⁾, corrigés géométriquement.

En effet, les déformations de la photographie liées aux effets du relief et à l'inclinaison de l'axe de la caméra doivent être éliminées. Pour cela il faut disposer d'un Modèle Numérique de Terrain obtenu à partir d'une restitution photogrammétrique classique sur un couple de clichés, où le pointé est effectué soit par un opérateur, soit au moyen d'un logiciel de corrélation automatique sur un restituteur automatique. Le fichier image ainsi obtenu par numérisation du cliché est orienté à l'aide des points de calage et corrigé de ses déformations grâce au MNT.

⁽⁸⁾ distance entre deux courbes de niveau consécutives



➤ Les corrections géométriques

Corriger géométriquement une image consiste toujours, en premier lieu, à déterminer une relation mathématique (modèle de déformation) entre les coordonnées dans l'image brute et les coordonnées dans le système de référence utilisé (carte, autre image de référence, ...) qui est celui de l'image corrigée à construire.

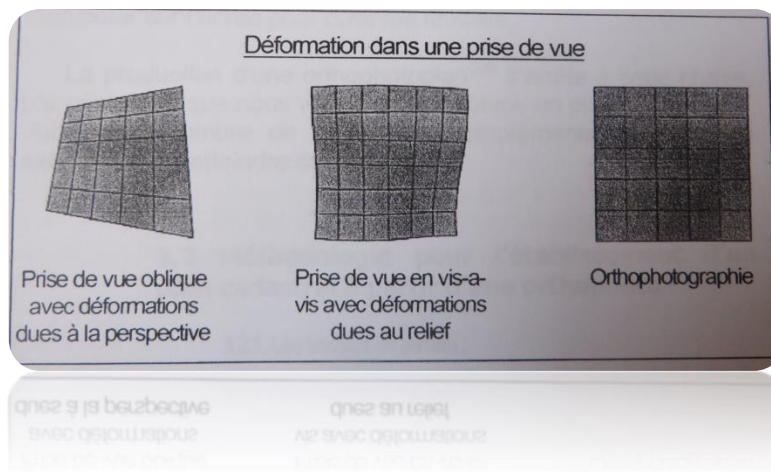
La transformation de la projection centrale (perspective) de la prise de vue aérienne vers la projection orthographique vise à corriger les effets du relief et du non verticalité de l'axe de prise de vue. A l'issue de cette opération, l'orthophotoplan devra être géométriquement correct, homogène, continu, sur la totalité de la région.

➤ Les corrections radiométriques

Les images doivent avoir une gamme de densité uniforme et un contraste tel que les détails apparaissent nettement tant dans les zones d'ombres que dans les zones très éclairées. Les photographies trop ou trop peu contrastées sont à rejeter. Les photographies doivent être exemptes de nuages, d'ombres de nuages, de fumée, de brume, de zébrure de lumière, de décharges d'électricité statique, ou d'autres défauts susceptibles de nuire à l'exploitation envisagée.

Des corrections radiométriques sont effectuées afin d'améliorer la couleur, les contrastes, d'éliminer des bruits et les parasites et d'obtenir une continuité visuelle des images assemblées. Les différents fichiers sont ensuite assemblés en une orthophotographie par mosaïquage.

Figure 13: Déformation dans une prise de vue [17]



- Le mosaïquage

C'est un assemblage des portions d'images, en faisant coïncider au mieux les détails homologues, en éliminant les zones de recouvrement et en rendant les raccords invisibles pour obtenir une image unique. Les lignes de mosaïquage suivent autant que possible les limites naturelles du terrain (route, canal, ...) afin d'éviter de trop grande discontinuité, il faut un recouvrement entre les images.

Une mosaïque d'images est le document résultant d'un assemblage d'images, de scènes ou de parties de scènes, connexes, issues d'une même famille de capteurs prétraitées pour être raccordables géométriquement et radiométriquement.

- La numérisation des images

La numérisation des images (orthophotographie) peut se faire de deux manières :

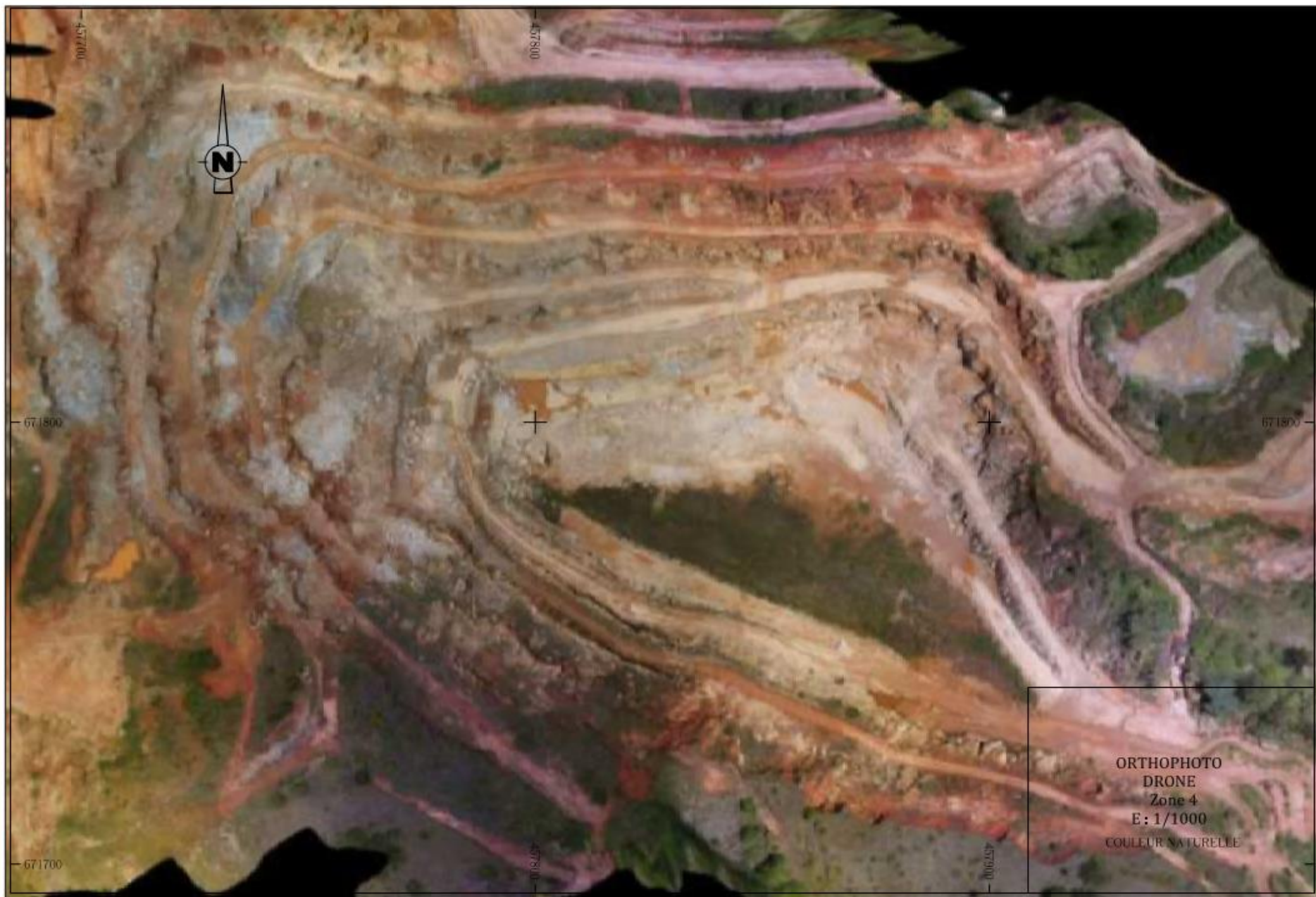
- Vectorisation
- Numérisation sur table ou à l'écran

IV. Les différentes catégories d'images

IV.1. Les types

On distingue deux catégories d'images à savoir :

- Les photos numériques
- Les photos analogiques



IV.2. Les avantages et inconvénients

Tableau 14: Avantages et inconvénients des catégories d'images

	Photo numérique	Photo analogique
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Contraintes de scannage éliminés ; - Possibilité de production d'images en multibandes (panchromatiques, couleur infrarouge) ; - Possibilité d'éliminer les défauts optiques de déformation d'image ; - Détection de multitudes d'informations de manière automatique (végétation, route, construction) ; - Génération d'une orthophoto pour une précision optimale des mesures (délais réduits, meilleure qualité géométrique) ; - Faible coût comparé aux méthodes traditionnelles 	<ul style="list-style-type: none"> - Photos moins nombreuses par rapport à la photo numérique - Qualité des photos scannées conditionne le nombre de pixels.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Objets difficiles à identifier pour l'interprétation et la lisibilité de l'orthophoto ; - La résolution conditionne la hauteur de vol ; - Nécessité des outils puissants pour le stockage et traitement des données ; - Nombre d'images plus nombreux par rapport à celui des photos analogiques ; - En raison de la taille du capteur numérique ; plus d'axe est nécessaire pour couvrir une zone donnée en numérique qu'en analogique (avec des recouvrements latéraux et longitudinaux égaux) 	<ul style="list-style-type: none"> - Possession d'une logistique de développement des films nécessaire ; - Perte de temps due au scannage ; - Risque de taches et rayures observables sur les photographies

Source : Auteur, année 2015

IV.3. Contrôle avant intégration

A ce stade, trois types de contrôles existent :

- Contrôles géométriques : c'est la comparaison des écarts entre l'orthophotoplan et un fichier vecteur.
- Contrôles radiométriques : c'est là où on fait la vérification de la qualité de l'orthophoto (qualité des couleurs, contrastes, lisibilité, ...) ;
- Contrôle de la mosaïque : cela consiste à vérifier la qualité des raccordements entre les différentes images qui composent l'orthophotoplans.

IV.4. Les avantages et inconvénients des images (orthophotographie) produites par un drone et les moyens humains

IV.4.1. Les avantages et inconvénients

Tableau 15: Avantages et inconvénients de l'orthophotoplan produite par un drone

ORTHOPHOTO	
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Format numérique -Réduction des coûts (personnel, matériel) en comparaison avec les méthodes classiques -Permet un enrichissement progressif et une mise à jour facile de carte et de cadastre ; -Flexibilité et rapidité de la mise en place jusqu'à l'analyse des images - Photo en Haute résolution ; -Très haute précision -Economique pour un projet sur une zone de très grandes surfaces dans un court laps de temps ; -Multitude d'informations (construction, végétation, ...) ; -Outil visuel d'aide à la décision ; -Possibilité de superposer différentes couches vecteurs.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Coût élevé de prestation si pas de photo disponible ou orthophoto disponible ; -Outils puissants nécessaires pour le traitement des données et au stockage des images ; -Coût des logiciels élevés dont la plupart sont des logiciels professionnels

Source : Auteur, année 2015

IV.4.2. Les moyens humains

Produire une orthophoto et plus qu'un métier, cela nécessite beaucoup d'attentions et une bonne forte connaissance de la photogrammétrie. C'est pour ces raisons même que les grandes entreprises font appel à des ingénieurs et/ou des spécialistes en photographie aérienne.

V. Analyse du coût et délai de la création du plan / images

Pour Madagascar, seule FTM possède des orthophotos couvrant certaines zones du territoire malgache. Ces prestataires spécialisés peuvent également réaliser une orthophotographie sur commande, ce qui implique une description précise du résultat souhaité. D'après nos enquêtes auprès de cette société, de nos jours, ils produisent encore des orthophotos. En voici quelques tableaux relatant le prix de l'orthophoto, produite en fonction de l'échelle de PVA et de l'échelle de l'ortho.

Tableau 16: Echelle Orthophoto

Faritany	Commune urbaine	Nb photos	Echelle photo	Nb coupures ortho pour le 1/10000	Echelle ortho
ANTANANARIVO	Antananarivo I	64	273/200-2003	13	Jusqu'à 1/5000
	Miarinarivo	7	174/400-1991	6	1/10 000
	Arivonimamo	12	174/400-1991	10	1/10 000
	Ambatolampy	39	218/100-1996	4	Jusqu'à 1/2500
	Antsirabe I	18	97Mad315/100	15	1/10 000
	Tsiroanomandidy	21	189/200-1994	7	Jusqu'à 1/5000

Source : F.T.M

- Les prix de l'orthophoto existant au F.T.M

Tableau 17: Prix de l'orthophoto au F.T.M

Echelle PVA	Echelle Ortho	Surface/Coupure (km ²)	Prix/Coupure (numérique) en Ariary	Prix/Coupure (Impression) en Ariary
1/20 000	1/20 000	117	206055.399	70 000
1/20 000	1/10 000	29.25	195 676	70 000
1/20 000	1/5 000	7.31	167336	70 000
1/20 000	1/2 500	1.83	117237	70 000

Source : F.T.M

- Délai de production d'une orthophoto au F.T.M

A titre d'exemple, pour produire une orthophoto à l'échelle de 1/10 000 de la zone d'Antsirabe II par exemple, à partir de l'échelle de la PVA 1/50 000, la société requiert un bon nombre de personnel et des matériels adéquats à la précision voulue.

Tableau 18: Exemple de mission d'orthophoto

	Désignation
Echelle PVA	1/50 000
Echelle Orthophoto	1/10 000
Surface de la coupure (km ²)	29.25
Surface à orthographier (km ²)	296.24
Nombre de clichés	8
Nombre de coupures	11

Source : F.T.M

Tableau 19: Temps machines

Matériels	Désignation	Durée (jours)	Heures	PU/h	Nombre	Coût production(Ar)	Coût total (Ar)
Temps machines	SCANNER	1.6	19.2	6512.6	1	125041.92	
	PC	5.59	67.08	331.6	2	44487.6	
	Station ORTHO	2.66	29.25	10661.89688	2	498976.64	
	HP 800	0	0	1045.6	1	0	
	Graveur CDROM	0.1	1	4446	1	8842	677348.159999

Source : F.T.M

Tableau 20: Temps personnel

PERSONNEL	Désignation	Durée (jour)	Heure	PU/h (Ar)		Coût production (Ar)	Coût total (Ar)
Temps personnel	8 Opérateurs	2.46	29.52	610.8	1.7	30652.3872	568886.8688
	2 Ingénieurs	0.62	7.44	2074.2	1.7	26234.4816	

Source : F.T.M

- Etude du coût d'établissement d'un plan topographique à l'aide d'un drone

Tableau 21: Temps sur terrain

Personnel					
Désignation	Qualité	Nombre	Nombre de jour	Taux journalier (Ar/j)	Total (Ar)
Chef de brigade	Ingénieur	1	1	200 000	200 000
Opérateur	Bac+ 3	1	1	40 000	40 000
Prix total					240 000

Source : Auteur, année 2015

Tableau 22: Matériels de production

Matériels de production				
Désignation	Unité d'œuvre	Nombre de jour	Coût de location (Ar /j)	Total (Ar)
GPS bi fréquence TRIMBLE	jour	1	600 000	600 000
Drone	jour	1	1 530 000	1 530 000
Total matériels de production				2 130 000

Source : Auteur, année 2015

Tableau 23: Charges indirectes

Charges indirectes					
Désignation	Quantité	Unité d'œuvre	Nombre	Taux journalier (Ar/j)	Total(Ar)
carburant	3	Litre/jour	5	10 000	150 000
Location 4x4	1	Jour	5	150 000	750 000
Hôtel	1	Jour	5	40 000	200 000
Total charges indirectes					1 100 000

Source : Auteur, année 2015

Tableau 24: Temps machine

TRAVAUX DE BUREAU				
Personnel				
Désignation	Nombre	Nombre de jour	Taux journalier (Ar/j)	Total(Ar)
Chef de brigade	1	2	200 000	400 000
Dessinateur	1	2	40 000	80 000
Matériel				
Ordinateur avec (Logiciel+Licence)	1	2	3 780 000	7 560 000

Source : Auteur, année 2015

Tableau 25: Prix du Logiciel Pix4D mapper Pro

PRIX 2016 DU LOGICIEL DE PHOTOGRAMMETRIE PIX 4D MAPPER PRO		
Licence courte 1 mois	Licence 1 an	Licence sans durée de temps
260 €uros	2600 €uros	6500 €uros
Location pour 30 jours consécutifs	Location pour 1 an- Economisez 2 mois sur une location mensuelle	Achat de licence définitive. Inclue la mise à jour du logiciel pour la première année.
Mise à jour	Mise à jour	Mise à jour. Option de mise à jour pour 650€ / an dès la deuxième année.
Installation sur 2 ordinateurs	Installation sur 2 ordinateurs	Installation sur 2 ordinateurs

Source : <http://www.axxess-solutions.com/photogrammetrie-drone-pix-4d.html>

Donc, d'après les tableaux ci-dessus, le coût de production est de :

$$240\,000 + 2\,130\,000 + 1\,100\,000 + 7\,560\,000 = 11\,030\,000 \text{ Ar}$$

Pour la charge indirecte (électricité, ...), le coefficient est de ~20% :

$$11\,030\,000 \text{ Ar} \times 1.20 = 13\,236\,000 \text{ Ar}$$

D'où le prix de vente (*coût de revient x marge de 25%*) est de :

$$13\,236\,000 \text{ Ar} \times 1.25 = 16\,545\,000 \text{ Ar}$$

Enfin, on a $TVA = 20\%$

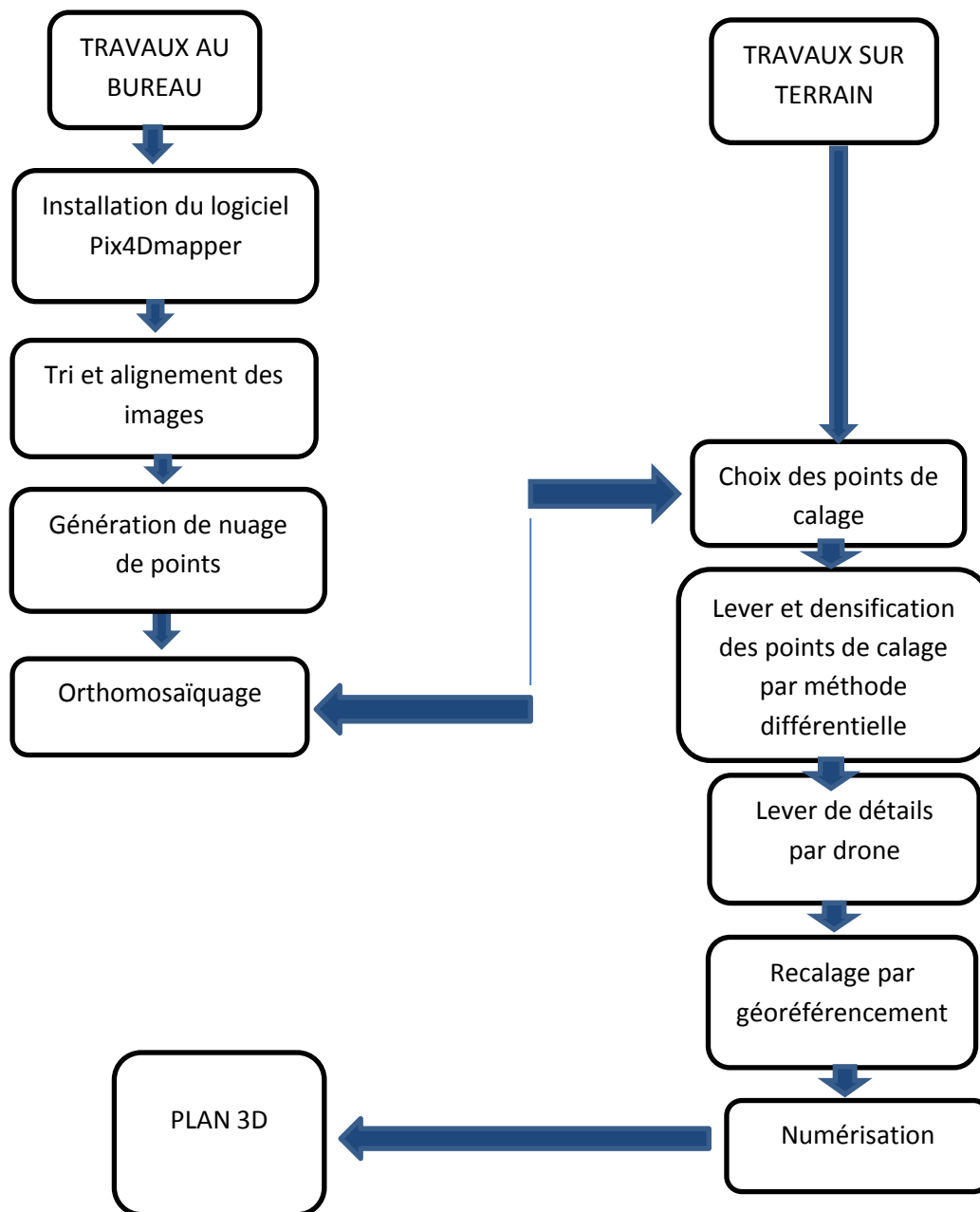
Alors le coût de production final est de :

$$16\,545\,000\text{Ar} \times 1.20 = \mathbf{19\,854\,000\text{ArTTC}}$$

Le montant total estimatif du coût de production du projet est de : « **Dix-neuf millions huit cent cinquante-quatre mille Ariary** » toutes taxes comprises.

VI. Organigramme de processus

Organigramme 3: Déroulement de l'établissement d'un plan à l'aide d'un drone



Source : Auteur, année 2015

CHAPITRE III. COMPARAISON DES DEUX METHODES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

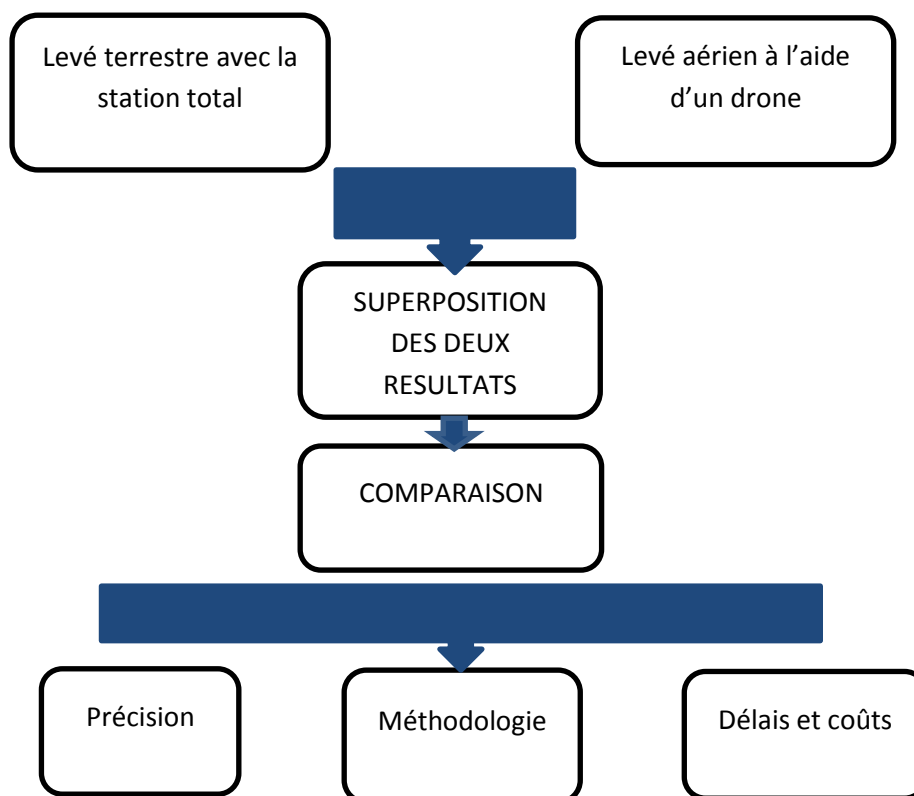
Dans ce chapitre nous allons comparer les étapes et les résultats obtenus dans la réalisation d'un plan topographique à partir d'un levé topographique avec une station total et le levé effectué par un drone.

Le but de ces comparaisons est de pouvoir mettre en place la chaîne complète d'acquisition et de traitement des données issues d'un lever par drone et surtout de voir la différence de précision.

Ainsi, les travaux qui ont été réalisés ont amené à prendre conscience des avantages de la méthode d'acquisition de données par drone mais également d'en apercevoir les limites.

I. Comparaisons

Organigramme 4: Etapes de comparaison



Source : Auteur, année 2015

I.1. Superposition des deux résultats

Afin de voir la différence de précision entre les deux méthodes d'acquisition, on va rattacher les points de calage avec les canevas de levé topographique et puis on va superposer l'image issue du drone et son MNT après géoréférencement avec le levé topographique effectué avec la station total.

Tableau 26: Synthèse des comparaisons

Appareils	Plan topographique	MNT	Orthophotographie
	Précision à 1σ plani /alti	Précision altimétrique à 1σ	Qualité visuelle
Station total	+/-6cm/+7cm	+/-10cm	-
Drone	+/-5cm/+5cm	+/-7cm	Bonne

Source : Auteur, Année 2015

- MNT (modèle numérique de terrain) fourni par le drone avec un pas de 1m
- MNS ou MNE (modèle numérique d'élévation) avec un pas de 10cm
- Orthophotoplan avec une taille de pixel au sol 5cm

I.2. Comparaison de la méthodologie

I.2.1. Préparation

Tableau 27: Comparaison de la préparation

Levé terrestre par station total	Levé aérien par drone
<ul style="list-style-type: none"> • Documents nécessaires <ul style="list-style-type: none"> ☞ Carte ou plan ☞ Ordre de mission • Étude de la zone à lever (relief, occupation du sol, ...) • Choix des points d'appui • Préparation des matériels 	<ul style="list-style-type: none"> • Documents nécessaires <ul style="list-style-type: none"> ☞ Carte/orthophoto et plan ☞ Ordre de mission ☞ Droit de survol de la zone • Etude de la zone à lever • Choix des points de calage • Préparation du plan de vol • Préparation des matériels (batterie de recharge, drone en bon état de vol, ...) • Installation du logiciel à utiliser • Consultation du bulletin météorologique

Source : Auteur, année 2015

I.2.1.1. Reconnaissance

Tableau 28: Comparaison de la reconnaissance

Levé terrestre par station total	Levé aérien par drone
<ul style="list-style-type: none"> • Renseignement sur la zone d'étude • Vérification de l'existence et accessibilité des points d'appui • Choix de l'emplacement des points de station • Choix des détails à lever • Etude du relief • Vérification du passage et de l'intervisibilité des visées • Chef de mission : évalue les délais et coûts des travaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Renseignement sur la zone d'étude • Vérification de l'existence des points d'appui (point de référence) • Choix et matérialisation des points de calage (points à la fois identifiables sur le terrain et sur les photos) • Chef de mission : évalue les délais et coûts des travaux

Source : Auteur, année 2015

I.2.1.2. Matériels utilisés**Tableau 29:** Comparaison entre les matériels utilisés

Levé terrestre par station total	Levé aérien par drone
01 Station total avec accessoires 01GPS bi fréquence 01 Ordinateur portable 01 Logiciel topographique (AUTOCAD-COVADIS) Moyens de communications	01 Drone avec accessoires 01 GPS bi fréquence 01 Ordinateur 01 Logiciel de traitement d'image (PIX4DMAPPER)

Source : Auteur, année 2015**I.2.1.3. Méthode de mesure****Tableau 30:** Comparaison entre les méthodes de mesure

Levé terrestre par station total	Levé aérien par drone
<ul style="list-style-type: none"> Etablissement des points d'appui : <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode différentielle (GPS) Transformation des coordonnées géographiques WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar Levé des points de détails : <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode par rayonnement : mesures d'angle et de distances 	<ul style="list-style-type: none"> Levé des points de calage <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode différentielle(GPS) Transformation des coordonnées géographiques WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar Prise de vue aérienne (mode continu)

Source : Auteur, année 2015

I.3. Etude comparative du coût et délai d'exécution

Tableau 31: Comparaison du coût et délai

Levé terrestre par Station Total			Levé aérien par Drone		
Nature des opérations	Personnel utilisé	Nombre de jour	Nature des opérations	Personnel utilisé	Nombre de jour
	CB O T M			CB O	
Travaux de terrain : reconnaissance, pose des bornes	1 1 2 1	1	Travaux de terrain : reconnaissance, piquetage sur support photo, poses des bornes et des balises	1 1	1
Levé des points d'appui par GPS (mode différentiel)	1 1	1	Levé des points de calage par GPS (mode différentiel)	1 1	1
Levé par station total	1 1 2	5	Levé par drone (prise de vue aérienne)	1 1	Demi-journée
Travaux de bureau : transfert des données, calcul de Vo et des coordonnées des points, dessin, transformation des coordonnées géographiques en WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar	1 1	5	Travaux de bureau : production de l'image (stéréopréparation, aérotriangulation , restitution, orthorectification, numérisation)	1 1	2
Coût total en (Ariary)	55 170 000		Coût total en (Ariary)	19 854 000	

CB : Chef de Brigade : ingénieur

Source : Auteur, année 2015

O : Opérateur

T : Technicien

M : Manœuvre

I.4. Limite d'utilisation d'un drone

Nombreux sont les utilisateurs et certaines personnes qui ne connaissent pas encore l'utilisation d'un drone comme outil topographique fiable pour l'établissement d'un plan topographique et se demandent jusqu'à quelle limite on peut l'utiliser et exploiter l'image qu'on obtient avec. Jusqu'à quelle échelle on peut vraiment établir un plan topographique? Ou une orthophoto ?

I.4.1. Classification d'un plan topographique

Tableau 32: Classification sommaire des cartes et plans

ECHELLES	FINALITES
1/1 000 000 et en-dessous 1/500 000	Cartes géographiques à petites échelles
1/250 000 à 1/100 000	Cartes topographiques à petites échelles
1/50 000, 1/25 000 et 1/20 000	Cartes topographiques à moyennes échelles
1/10 000	Cartes topographiques à grandes échelles
1/5 000	Plans topographiques d'étude, plan d'urbanisme
1/ 2 000	Plans d'occupation du sol, descriptifs
1/1 000 1/500	Plans parcellaires, cadastraux, urbains
1/200	Plan de voirie, d'implantation, lotissement
1/100	Plan de propriété, plan de masse
1/50	Plan d'architecture, de coffrage, ...

Source : Cours Topométrie, année 2012

I.4.2. Limite d'utilisation d'un drone [19]

Malgré ses nombreux atouts, l'utilisation du système drone peut parfois s'avérer complexe. Nous pouvons citer par exemple les difficultés rencontrées pour définir un plan de vol respectant scrupuleusement la réglementation (pas de survol de zones habitées, pas de vol à proximité d'aéroports, aérodromes, zones sensibles...). Cependant, les optimisations techniques et technologiques (intégration de systèmes de détecter/éviter, certification des systèmes drones...) associées à une évolution de la réglementation permettront sans aucun doute de pallier ces difficultés.

Les limites de poids imposées par la réglementation française ainsi que les performances des technologies existantes (batteries, capteurs, équipements de géoréférencement et centrales inertielles) limitent également les performances des systèmes drones.

Pour les vols hors vue, le poids maximum des drones est limité à 2 kg, ce qui restreint le choix des charges utiles embarquées. De même, l'autonomie allouée par des batteries de faible poids est encore limitée et ceci limite la surface à survoler depuis un même point de décollage/atterrissage. Le gain de temps est réel mais ce n'est pas encore optimisé.

Par ailleurs, les conditions météorologiques locales (vitesse du vent, précipitations...) peuvent impliquer des modifications des plans de vol ; modification pouvant être à l'origine de données lacunaires. Ainsi, malgré un paramétrage permettant un recouvrement important entre clichés (plus de 70% en longitudinal et transversal) l'aérologie locale peut parfois fortement influencer les acquisitions et les résultats.

Les conditions d'ensoleillement sont un point à prendre en compte : les ombres portées seront notamment un frein à la production d'une orthophoto homogène en présence d'arbres, bâtiments.

L'analyse des données nous a également permis d'étudier la qualité et la précision des livrables et de définir les limites d'acquisitions par drone. En effet, les résultats obtenus ne nous permettent pas une discrimination fiable des zones avec ou sans végétation mais pour remédier à cela il suffit de faire la prise de vue d'un terrain dégagé ou d'un sol en terre ou bien avec des herbes coupées à ras, cela permettra par la suite, d'éviter les erreurs dues à la différence entre le sol mesuré au tachéomètre et le sol modélisé par la photogrammétrie qui serait couvert de végétation.

II. Interprétation

Après avoir fait la comparaison des deux résultats, le tableau suivant interprètera les avantages et inconvénients du levé terrestre par station total et du levé aérien effectué avec un drone.

Tableau 33: Avantages et inconvénients des travaux effectués par les deux appareils utilisés

	Levé terrestre par station total	Levé aérien par drone
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un plan topographique à petite et à grande échelle -Points d'appui dans un même système de coordonnées -Libre au choix de l'échelle -Levé altimétrique et planimétrique possible 	<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un plan topographique et d'une carte topographique à petite et à grande échelle -Acquisition possible pour les sites dangereux et inaccessibles -Faible coûts (personnel, matériel) par rapport à la méthode classique -Flexibilité et rapidité de la mise en place jusqu'à l'analyse des images -Moins cher, plus rapide et plus précis pour une zone de grande surface -Mise à jour facile de carte et de cadastre -Possibilité d'utilisation pour plusieurs applications (mise en évidence des zones affectées par l'érosion, détermination de la surface imperméable,...)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un polygonal de base au cas où on ne choisit pas la méthode différentielle -Existence des zones inaccessibles -Coûts des travaux élevés -Levé de détails demande plus de temps 	<ul style="list-style-type: none"> -Déformation au niveau de l'image -Nécessité de nombreux points de calage -Nécessité d'un beau temps

Source : Auteur, année 2015

III. Perspectives de recherche

III.1. Plan de comparaison

Durant ces cinq dernières années la société SECAM effectuait des opérations topographiques consistant à voir l'évolution de la carrière de l'Ibity. Ceci, nous a permis de faire une fois par an un comparatif de ce qui a été planifié dans la production et de ce qui a été concassé réellement. L'année dernière, on a utilisé un drone afin d'obtenir un suivi plus précis de l'exploitation du gisement.

III.2. Technique d'implantation

III.2.1. Définition

L'implantation consiste à matérialiser sur le sol par des piquets en bois ou en fer, selon l'exigence du lieu, les différents points constituant le tracé en plan (tracé d'axe).

III.2.2. Objectifs

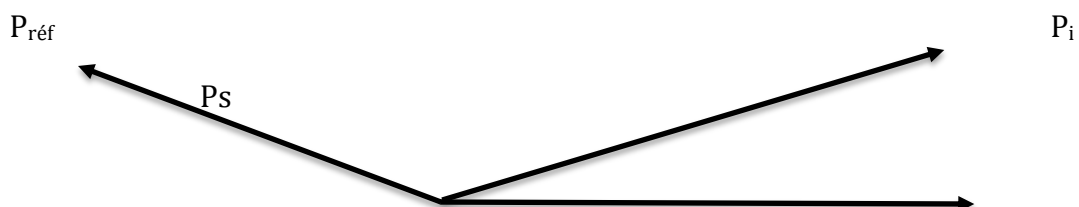
Les éléments d'implantation peuvent être acquis directement à partir du MNT ou du plan numérique de terrain par piquage des points selon les distances voulues sans intervention de calcul.

Le but de cette section est d'implanter les points d'axe de la carrière à partir de ses coordonnées (X, Y, Z) acquises par la méthode moderne.

III.2.3. Méthodologie : Utilisation de Station Total

III.2.3.1. Principe

Le principe consiste à faire une implantation polaire, c'est-à-dire par la mesure d'angle et distance de point à implanter à partir des points d'appui.

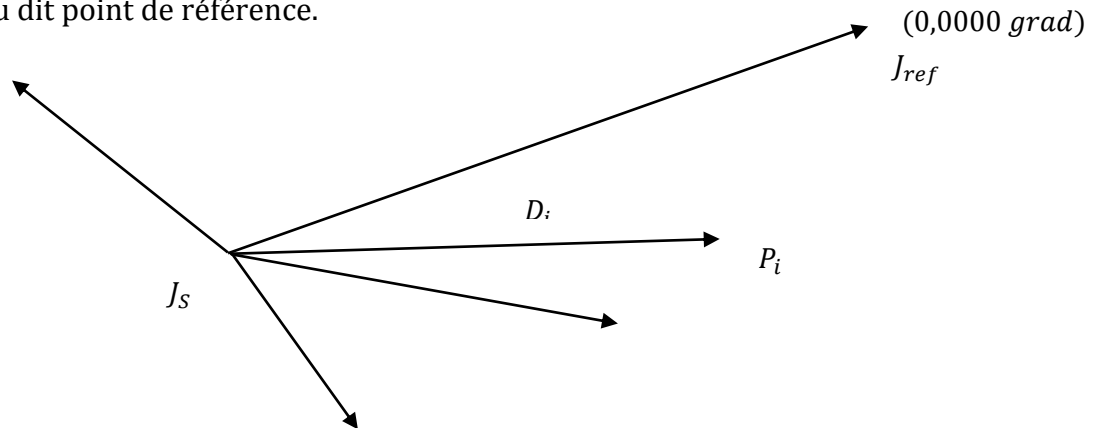


$P_{\text{réf}}$: Point de référence

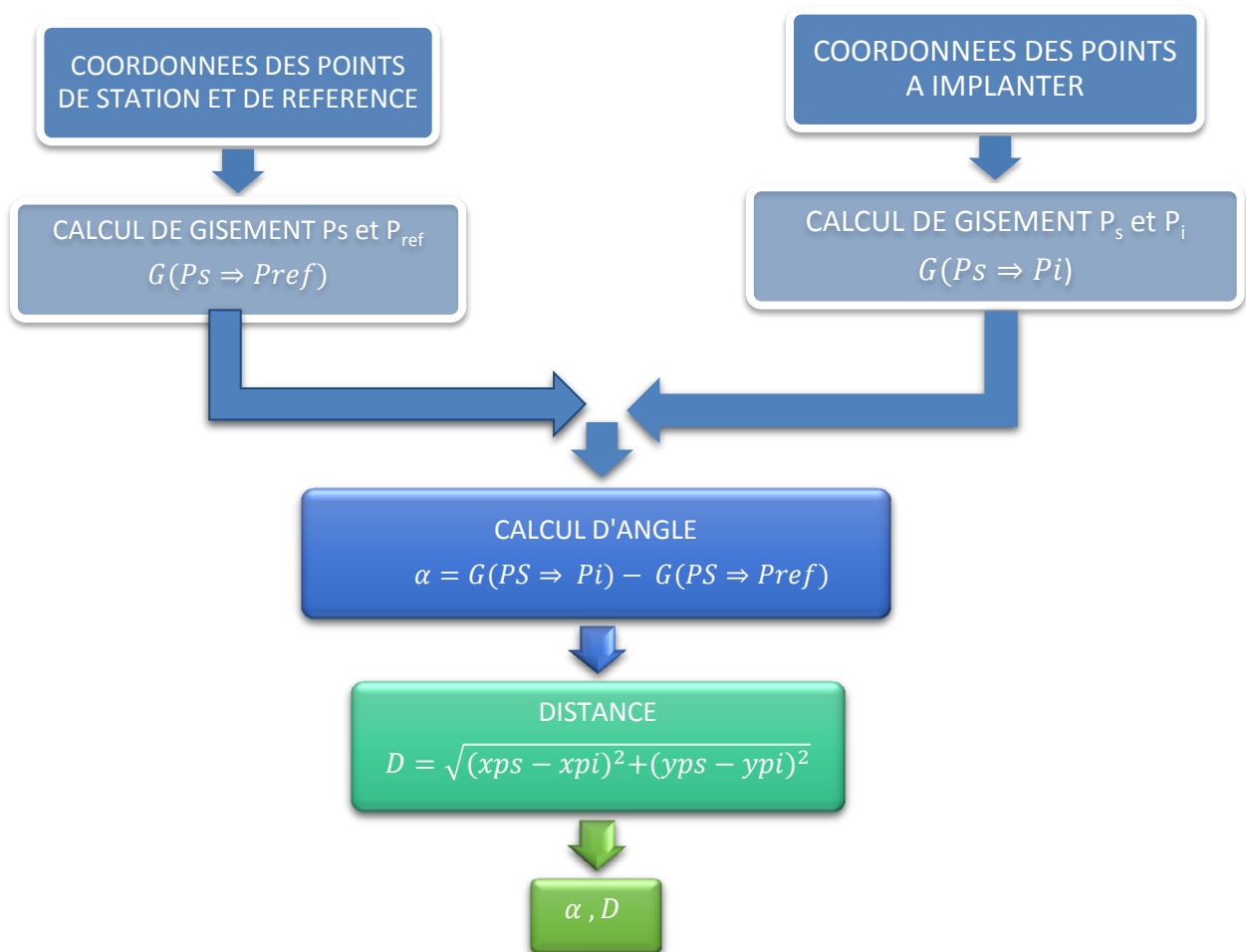
P_i : Point à implanter

P_s : Point de station

Ainsi, la préparation au bureau concerne le calcul d'angle (α_i), de la distance (d_i) de chaque point d'implantation à partir d'un point de station connue et d'un autre point connu dit point de référence.



N.B : Tous les points à implanter sont donnés, en annexe 4

Organigramme 5: Processus de calcul

Source : Cours d'implantation, année 2013

III.3. Calcul de Cubature

La détermination de quantité de mouvement de terre total est traitée dans le logiciel Covadis. Il existe plusieurs mode de calcul, mais on utilise la méthode entre deux MNT (modèle numérique du terrain). L'opération consiste à établir le MNT du terrain naturel et le MNT du projet à réaliser. On superpose ces deux MNT pour obtenir le résultat.

Caractéristiques des modèles numériques

Calque MNT1	TNMNT15
Calque MNT2	TN_MNT 14

	MNT 1	MNT 2
Nombre de faces	4146	7636
Altitude mini	1477.230 m	1477.414 m
Altitude maxi	1570.520 m	1581.220 m
Surface totale 2D	106851.81 m ²	129835.94 m ²
Surface totale 3D	128144.74 m ²	158166.65 m ²
Surface utile 2D	88577.44 m ²	88577.44 m ²
Surface utile 3D	108123.86 m ²	112012.22 m ²

Résultats du calcul de cubatures MNT1 → MNT2

Surfaces 2D		
Avec déblai	:	46019.47 m ²
Avec remblai	:	42557.96 m ²
Sans écart	:	0.00 m ²
Total	:	88577.44 m ²

Volumes		
Déblai	:	140682.283 m ³
Remblai	:	129173.944 m ³
Total	:	269856.227 m ³

Surfaces 3D		
Avec déblai	:	51885.23 m ²
Avec remblai	:	56238.63 m ²
Sans écart	:	0.00 m ²
Total	:	108123.86 m ²

III.4. Prévion dans 1an**Caractéristiques des modèles numériques**

Calque MNT1	TNMNT15
Calque MNT2	TN_MNT1 PROJET

	MNT 1	MNT 2
Nombre de faces	4146	4248
Altitude mini	1477.230 m	1508.863 m
Altitude maxi	1570.520 m	1598.849 m
Surface totale 2D	106851.81 m ²	34363.97 m ²
Surface totale 3D	128144.74 m ²	51831.32 m ²
Surface utile 2D	26287.52 m ²	26287.52 m ²
Surface utile 3D	34623.38 m ²	38414.86 m ²

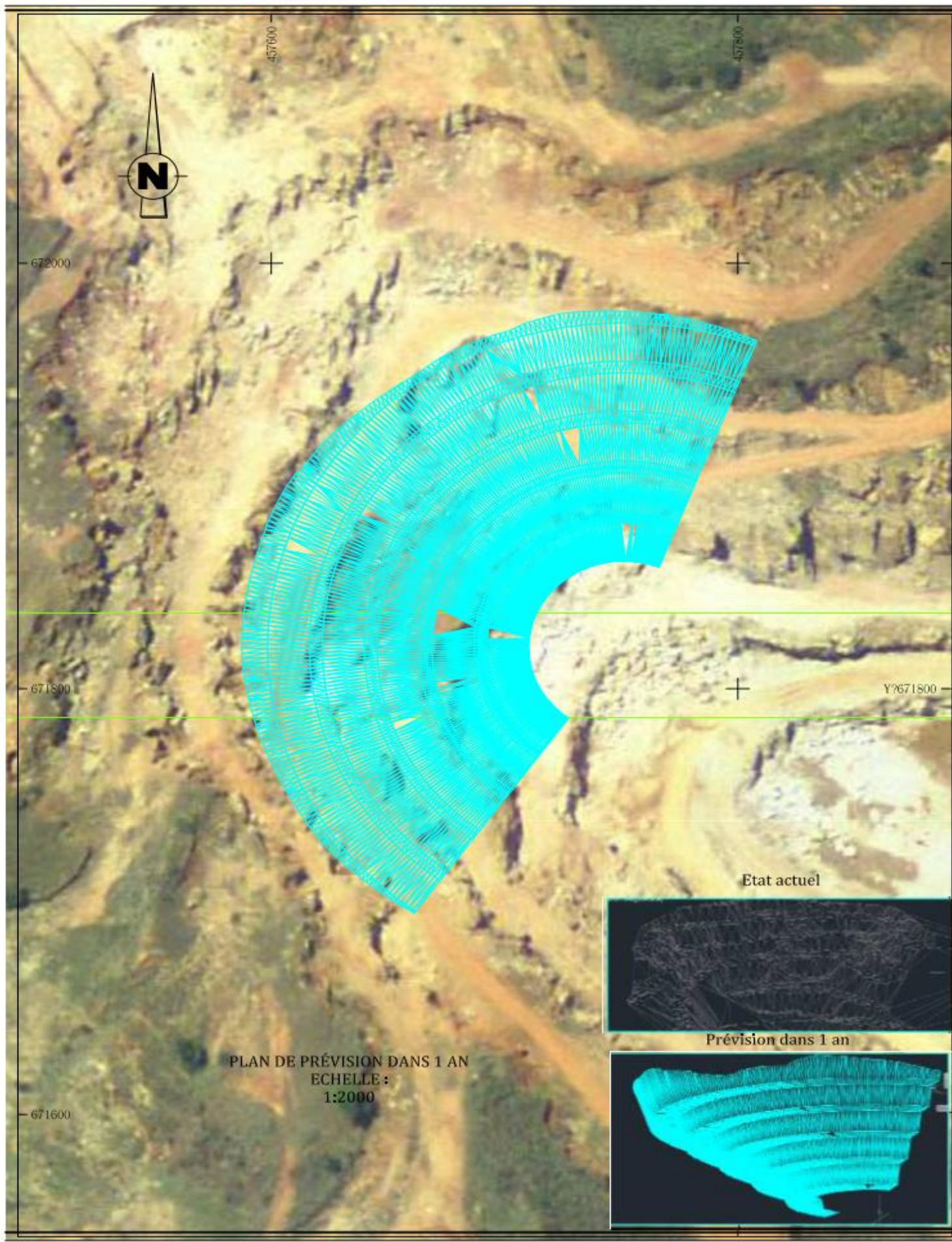
Résultats du calcul de cubatures MNT1 → MNT2

Surfaces 2D		
Avec déblai	:	11043.03 m ²
Avec remblai	:	15244.48 m ²
Sans écart	:	0.00 m ²
Total	:	26287.52 m ²

Volumes		
Déblai	:	84606.961 m ³
Remblai	:	145499.931 m ³
Total	:	230106.892 m ³

Surfaces 3D		
Avec déblai	:	14530.30 m ²
Avec remblai	:	20093.08 m ²
Sans écart	:	0.00 m ²
Total	:	34623.38 m ²

Les résultats ci-dessus vont nous permettre de faire une prévision de la forme de la carrière d'ici 1an.



IV. Recommandations

- L'utilisation du GPS différentiel ayant une précision centimétrique est recommandée pour le levé des points de calage si on veut avoir de bons résultats.
- On devrait avoir le maximum de points de calage surtout pour les zones accidentées
- La possession d'un ordinateur robuste et d'un logiciel adapté pour le traitement des images est indispensable
- Le maximum de connaissance en photogrammétrie est recommandé.

CONCLUSION

Le travail que nous avons effectué a permis de mettre en avant certaines limites et d'évaluer le potentiel exact des techniques de mesure par drone.

Le drone, présente un intérêt technique pour la qualité des rendus, des analyses plus poussées ont été réalisées sur l'intégralité du massif de l'Ibity.

L'acquisition des données est sécuritaire car aucun accès en zones dangereuses n'est nécessaire et l'auscultation en zone inaccessible devient également possible. Toutefois, il est possible pour certaine situation de pas faire une descente sur terrain.

Le système drone offre une alternative aux scanners laser qui se voulaient être le futur de la modélisation 3D avant son arrivée. Puis, il présente un attrait indéniable auprès d'une population curieuse de nouvelles technologies.

L'utilisation d'un drone est économique car les mesures sont réalisées rapidement et les traitements s'effectuent depuis un poste informatique à travers un logiciel ce qui réduit considérablement les coûts d'acquisition et d'analyse.

Le relevé par drone que nous avons effectué nous a donc permis d'obtenir des données très précises et cela très rapidement. Et la comparaison des données par ce relevé et celles obtenues par le biais d'un relevé classique avec une station total, montre une très faible variation de précision, mais un gain de temps très important.

En tout cas, l'utilisation de drone nécessite des compétences et habilitations spécifiques, justifiant de faire appel à des personnes compétentes et des entreprises spécialisées.

Bref, les drones ont un bel avenir dans la profession des géomètres- topographes.

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation de HOLCIM Madagascar**I. Historique et politique globale de Holcim Madagascar****I.1. Historique**

Holcim Madagascar appartient à la zone Outre-Mer de Holcim Groupe, qui regroupe Holcim Réunion, Bourbon, Holcim Mauritius, Holcim Calédonie et Holcim Madagascar.

Depuis l'année 1950 cette société a connu de nombreux changements avant d'arriver au stade où elle est aujourd'hui. Cette année-là fut créée la société MACOMA dont le siège se trouve à Antananarivo.

Dans les années 1960, une agence MACOMA à Tamatave fut créée, et le groupe MACORE s'est implanté à la Réunion. En 1985, la cimenterie d'Ibity (Antsirabe) fut inaugurée sous le nom de CIMA. En 1987, la société MACOMA devient la filiale de MACORE.

En 1990, la CIMA fut racheté par une société Nigérienne. CIMA devient alors ABACIMAL. Un terminal cimentier fut créé à Tamatave en 1992 qui porte le nom de SCOI.

En 1994, MACOMA devient filiale du groupe Holderbank, ABACIMAL devient SOMACIM après son rachat par le groupe Holderbank.

En 2001, le groupe Holderbank change de nom pour adopter la dénomination de HOLCIM.

En 2002, les filiales du groupe Holderbank deviennent HOLCIM. MACOMA Antananarivo devient le siège social de HOLCIM (Madagascar) ; SOMACIM devient l'usine HOLCIM de l'Ibity ; SCOI devient le Terminal cimentier de HOLCIM à Tamatave ; Le groupe MACORE devient HOLCIM La Réunion auquel HOLCIM Madagascar est rattachée.

Actuellement le siège de la société HOLCIM Madagascar se trouve à Tsaralalàna au 1 bis Rue, P. Lumumba en face de l'hôpital des enfants.

Photo 10 : Société Holcim Madagascar d'Antsirabe

Source : Auteur, année 2015

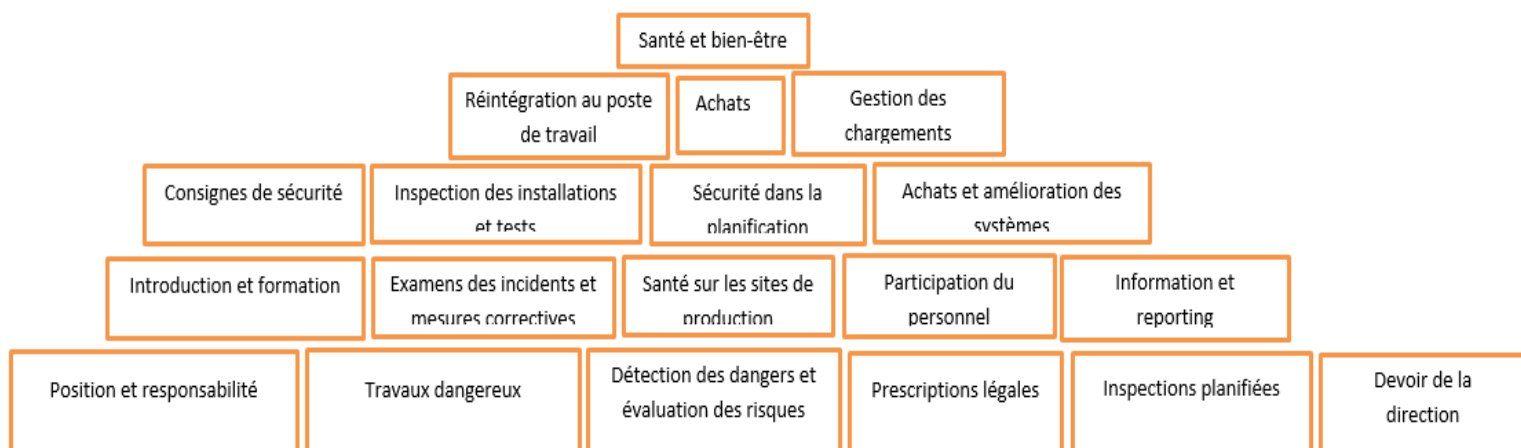
I.2. Politique globale

Depuis, la société ne cesse d'évoluer dans l'idée d'une amélioration continue et surtout visant à : « zéro accident et zéro maladie ». Cela correspond bien dans leurs priorités, qui sont les suivantes :

- l'éducation
- l'environnement
- la satisfaction clientèle
- la santé et sécurité au travail.

Ce sont des priorités identifiées suivant la politique QSE. L'ensemble des employés de Holcim vient sous ses conditions.

Dans cet angle, pour Holcim, la culture sécurité est primordiale, voire même vitale. Les activités sont poursuivies dans la perspective d'un meilleur avenir pour eux mais en se souciant également de celui des autres.

Figure 14: Pyramide de la sécurité du groupe Holcim

Source : Holcim, année 2015

La pyramide OH&S de Holcim montre combien variés sont les éléments qui exercent une influence sur la sécurité et la santé au travail. L'objectif prioritaire des efforts de l'entreprise sur le plan de la sécurité est la santé et le bien-être du personnel. (OH&S : Occupational Health and Safety).

Figure 15: Les règles cardinales de sécurité du groupe Holcim



Source : Holcim, année 2015

Annexe 2 : Détermination planimétrique des points

- Calcul des angles horizontaux pour la polygonation

C'est le traitement des observations. On vérifie les observations sur le carnet et on fait des calculs pour éviter les retours sur terrain.

Moyenne des lectures à chaque visée :

$$L = \frac{\sum_i^n l_i}{n} \quad (16)$$

n : nombre de lectures

$\sum_i^n l_i$: Somme de lecture

L : lecture de chaque visée

- Calcul des angles au sommet à chaque séquence

L'angle au sommet est la différence des lectures entre la référence et le point visé.

En général, on détermine les angles au sommet par la formule suivante :

$$H_i = \frac{[(L(i+1) - L_{Ref})CG + (L(i+1) - L_{Ref})CD]}{2} \quad (17)$$

Moyenne des angles au sommet:

$$H_i = \frac{H_{i(0)} + H_{i(100)}}{2} \quad (18)$$

$H_{i(0)}$: Angle au sommet d'origine 0

$H_{i(100)}$: Angle au sommet d'origine 100

- Calcul des angles verticaux

De même pour l'angle vertical, on cherche les valeurs des angles.

Calcul des angles de chaque séquence:

$$V1 \text{ ou } V2 = [VCG + (400 - VCD)]/2 \quad (19)$$

L'angle vertical de chaque visée :

$$V = (V1 + V2) / 2 \quad (20)$$

- Calcul de gisement approché

On rappelle que le gisement d'une direction est l'angle horizontal mesuré positivement dans le sens horaire entre l'axe des ordonnées du système de projection utilisé et cette direction.

$$G_{(i, i+1)} = G_{ref} + H_i \pm 200 \text{gon} \quad (21)$$

$G_{(i, i+1)}$: gisement de $i, i+1$

G_{ref} : gisement de référence

H_i : angle au sommet

Calcul de gisement G_{S1R} :

$$\tan G_{S1R} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (22)$$

- Distance horizontale

Avec un théodolite, la distance obtenue sur terrain est toujours la distance suivant la pente. On devrait réduire cette distance à l'horizontale, dont la formule est :

$$D_h = D_p \cos V \quad (23)$$

V : le gisement

D_h : la distance horizontale en mètre réduite à l'horizon

D_p : distance suivant la pente

- Correction à faire lors de la mesure de distance

➤ Correction au niveau zéro :

La distance sur l'ellipsoïde est la distance horizontale, ramenée au niveau de l'ellipsoïde.

$$D_e = \frac{D_h \times R}{R+h} \quad (24)$$

D_e : Distance réduite à l'ellipsoïde

R : Rayon de courbure de la terre avec $R = 6400 \text{ km}$

h : altitude moyenne des points en km

➤ Correction de réduction à la projection :

$$D_r = K \times D_o \quad (25)$$

D_o : Distance réduite à l'ellipsoïde

D_r : Distance réduite à la projection

$K = 1/\alpha$: coefficient de réduction d'échelle

Le coefficient de réduction d'échelle ne peut pas être calculé directement, mais on calcule le coefficient η afin de déduire la valeur de K

$$\eta = (X_v - X_0) \cos 21gr - (Y_v - Y_0) \sin 21gr \quad (26)$$

Avec $X_0 = 400\,000\text{m}$ et $Y_0 = 800\,000\text{m}$

η : distance d'un point par rapport à l'isomètre

$$\eta_R = 95872,7802$$

$$\eta_{S1} = 96076,48909$$

En faisant le calcul à partir de la table indirecte nous avons les résultats suivants :

On prend la valeur du coefficient de réduction d'échelle $K = (\eta_R + \eta_A)/2 = 0,99960242$

Calcul des coordonnées définitives :

$$\begin{aligned} X_{\text{visé}} &= X_{\text{Station}} + D_r \cdot \sin G_{ST_{\text{visé}}} \\ Y_{\text{visé}} &= Y_{\text{Station}} + D_r \cdot \cos G_{ST_{\text{visé}}} \end{aligned} \quad (27)$$

Annexe 3: LES SCENARIOS OPERATIONNELS

Afin de permettre une utilisation raisonnée des UAV, la Direction Générale de l'Aviation Civile a établi quatre scénarios de vol en fonction des catégories de drone. Ces scénarios opérationnels permettent de distinguer les opérations réalisées à vue du pilote (scénario S1 et S3 : horizontale maximale de 100m et hauteur maximale d'évolution de 150m) des opérations hors vue (scénarios S2 et S4 permettant de faire évoluer le drone sur plusieurs kilomètres pour un plafond d'altitude pouvant atteindre 150m).

S'il est assez aisé de déployer des engins relativement légers, évoluant à vue, hors zones peuplées, il est plus difficile de faire évoluer un aéronef télépilote lourd (supérieur à 4kg) ou en zone peuplée. Le survol d'agglomérations ou de rassemblements de personnes n'est par exemple possible qu'après obtention d'une autorisation préfectorale délivrée auprès du service de la défense et de la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile). Pour la réalisation d'opérations hors vue du télépilote, nous pouvons par exemple citer le scénario S4 soumis à autorisation de la DGAC. Pour chaque mission nécessitant la mise en œuvre de ce scénario, l'exploitant doit établir un dossier cosigné avec le donneur d'ordre de mission et le soumettre à la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile. Ce dossier doit contenir l'ensemble des informations relatives à la mission, au plan de vol projeté et à l'analyse réglementaire réalisée par l'opérateur (distance à l'aérodrome le plus proche, évitement des zones peuplées,...). Après l'obtention de cet accord, les opérations peuvent être effectuées dans les espaces aériens autorisés à condition de notifier l'intervention par courrier électronique au plus tard 24h avant chaque vol.

Tableau: Les différents scénarios de vol

Scénario	Distance d'éloignement maximum	Contraintes	Hauteur max. D'évolution	Masse max. autorisée au décollage
S1	100 m	Hors zone peuplée	150 m	25kg
S2	1 000 m	Hors zone peuplée	< 2kg 150 m >2kg 50 m	25kg
S3	100 m	En zone habitée	150 m	4kg
S4	>1 000 m	Hors zone peuplée	150m	2kg

Source : Revue XYZ.N° 141-4^e trimestre 2014

Annexe 4: PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME GPS

- **Principe du système GPS**

Définition :

Le système GPS (Global Positioning System) est un système de radiolocalisation par satellite. Il est composé de 24 satellites qui tournent autour de la terre à une altitude de 20 200km. Il permet de positionner tout objet fixe ou mobile au voisinage de la surface terrestre.

Avantage :

Il offre un champ d'applications très vaste que les techniques classiques compte tenu de plusieurs critères : délais d'exécution très courts, fiabilité des résultats, système tout temps et continu, absence de contraintes d'inter-visibilité ou de répartition géométrique, positionnement en temps réel, ...

- **Les bilans des erreurs**

Erreurs dues au système GPS

- Une erreur d'horloge : les horloges des satellites sont amenées à dériver par rapport au temps GPS de référence.
- Une erreur d'orbite : les orbites réelles décrites par les satellites diffèrent de l'orbite képlérienne sous l'effet d'actions perturbatrices telles que la non-sphéricité de la terre, l'attraction du soleil et de la lune, les marées océaniques : cette erreur est de 20 m

Erreurs dues à la propagation du signal

- Avant d'arriver au récepteur, les signaux traversent deux couches de l'atmosphère dont les caractéristiques provoquent des perturbations à la propagation :
- L'erreur due à la réfraction troposphérique : varie de quelques centimètres, à 10mètres
- L'erreur due à la réfraction ionosphérique : peut varier de quelques mètres, à quelques dizaines de mètres.
- L'effet de multi-trajet, de nature à provoquer des erreurs pouvant aller de quelques centimètres, à 10 mètres.

Erreurs dues au récepteur

- C'est l'erreur d'horloge du récepteur qui peut atteindre et dépasser 100 m

Les fautes

- Le segment de contrôle, humain ou informatique, peut provoquer des erreurs du mètre à la centaine de kilomètres de l'utilisateur.
- L'erreur sur la sélection du datum peut se chiffrer du mètre à la centaine de mètres.
- La défaillance du récepteur, tant au niveau matériel que logiciel.
- **Les types de positionnements**

Les codes

Le code C/A donne accès au service SPS (Standard Positioning Service) qui permet avec un seul récepteur d'obtenir une précision de 15 à 20m lorsqu'il n'est pas dégradé.

- Positionnement absolu

La navigation est le but initial du système GPS. Elle consiste à localiser des véhicules sur terre, sur mer ou en l'air. La technique consiste à mesurer au moins 4 pseudo-distances (code C/A et P-code) sur quatre satellites au moins à partir d'un seul récepteur. La durée d'observation est de 30 secondes minimum, mais il vaut mieux attendre un peu plus pour affiner la mesure. Le résultat est une position en temps réel.

Les GPS portables

Les GPS portables ou (GPS de poche) est un GPS mono fréquence. Il résout les pseudo-distances uniquement par le code C/A. Il encaisse toute l'erreur d'orbite et ne corrige pas les erreurs iono-atmosphériques que par les messages reçus des satellites. Il encaisse donc la différence entre le modèle satellite et les conditions réelles au moment de la mesure. De ce fait, sa précision sur une mesure est plus proche de 5m en X et Y sur une seule mesure, à condition d'être en terrain dégagé et de meilleur appareil. Mais, l'erreur peut atteindre jusqu'à 30m si les conditions ne sont pas bien respectées. Cependant, en faisant de nombreuses mesures à des moments différents l'écart-type diminue jusqu'à 3.5m.

Les GPS bi fréquences en mode absolu

La précision est plus améliorée en utilisant, les GPS professionnels, en positionnement statique. Ce GPS peut enregistrer de nombreuses mesures en

augmentant la durée d'enregistrement d'observation (quelques heures). Mais du fait des influences iono-atmosphériques, de l'erreur d'orbite, on descend rarement sous deux mètres (2m).

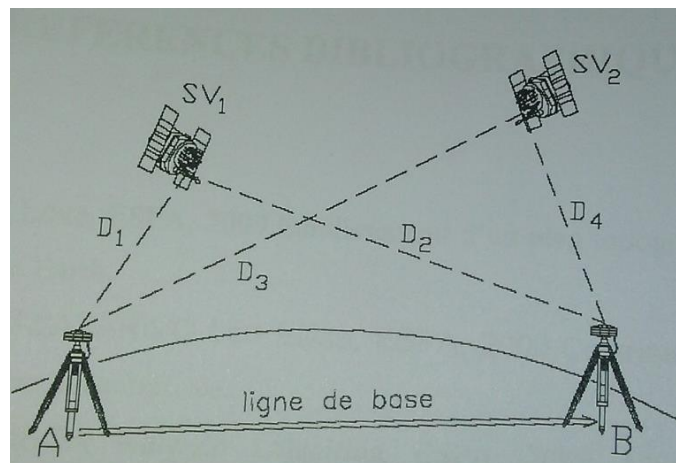
➤ Positionnement relatif (ou différentiel)

Pour obtenir une mesure différentielle, le problème principal est de déterminer le nombre entier de phases écoulées entre l'émission du signal par le satellite et la réception par l'antenne au sol afin d'en déduire la distance satellite-récepteur.

Le zéro arbitrairement fixé à l'allumage du récepteur ne fournit pas la partie entière de la phase ; c'est pourquoi il faut procéder par différence en utilisant deux récepteurs travaillant simultanément. Cette méthode, permet de résoudre l'ambiguïté de la partie entière de la phase. On parle de mode différentiel parce qu'on travaille par différence sur deux récepteurs placés sur deux points distincts et observant au même instant les mêmes satellites.

Dans le mode différentiel, on mesure des différences de distances et non des distances absolues. Par exemple, sur la fig. ci-dessous, deux récepteurs placés en A et B permettent, par la corrélation de leurs mesures (en post-traitement), de calculer les différences de distances (D_1-D_2) et (D_3-D_4).

Grâce à ce mode différentiel, la plupart des erreurs citées ci-dessus sont éliminées (cryptage S/A, influence de l'ionosphère, millimétriques).



Choix de la méthode d'observation utilisée

Selon les précisions de coordonnées désirées, il est possible de choisir entre les techniques de traitement suivantes :

MODE	CARACTERISTIQUES	PRECISION
Statique	Temps d'observation de longue durée (heure à jours) Lignes de base longues (>10km, par exemple)	+/-0.1mm à +/- 1ppm
Statique rapide Statique accélérée	Temps d'observation de courte durée (5à30 minutes) Lignes de base courtes (<10km, par exemple) Récepteur à double fréquence de préférence	+/- (5mm+1ppm)
Pseudo-cinématique	Temps d'observation de courte durée (quelques minutes) Réoccupation nécessaire de stations	+/- (5mm+1ppm)
Marche-arrêt Semi-cinématique	Temps d'observation de courte durée (quelques minutes) Maintenir le verrouillage du signal entre les stations	+/- (5mm+1ppm)
Cinématique	Aucun arrêt nécessaire Nécessité des logiciels très avancés	+/- (1à5cm +/- 1ppm)

Pour la réalisation d'un point géodésique, il est possible de choisir parmi les modes suivantes :

Mode pseudo-cinématique : Ce mode consiste à utiliser deux récepteurs, un récepteur fixe sur la station de référence durant toute la durée d'observation, l'autre baladeur occupant cinq à dix minutes les points inconnus deux à trois fois avec une heure au moins d'intervalle entre les occupations successives, avec possibilité d'éteindre le récepteur baladeur lors des déplacements entre les stations.

Mode stop and go : Ce procédé consiste à utiliser deux ou plusieurs récepteurs, un récepteur fixe restant sur la station de référence durant toute la durée d'observation et l'autre baladeur occupant les points inconnus pendant deux à trois minutes sans perte de contact avec les satellites pendant la cession d'observation.

Annexe 5: Table de projection Laborde

TABLE DIRECTE Donnant distance sur l'ellipsoïde				TABLE DIRECTE Donnant distance sur la projection			
η_2	$\frac{1}{K} = \frac{D_{\text{ellipsoïde}}}{D_{\text{projection}}}$	Δ_1	Δ_2	$K = \frac{D_{\text{projection}}}{D_{\text{ellipsoïde}}}$	Δ_1	Δ_2	η_2
		-	-		+	+	
0	1,0005 0025			0,9995 0000			0
		124			124		
10	4 9901		247	5 0124		247	10
		371			371		
20	4 9530		248	5 0495		247	20
		619			618		
30	4 8911		247	5 1113		247	30
		866			865		
40	4 8045		247	5 1978		247	40
		1113			1112		
50	1,0004 6932		248	0,9995 3090		248	50
		1361			1360		
60	4 5571		248	5 4450		247	60
		1609			1607		
70	4 3962		247	5 6057		248	70
		1856			1855		
80	4 2106		247	5 7912		246	80
		2103			2101		
90	4 0003		248	6 0013		248	90
		2351			2349		
100	1 ,0003 7652		247	0,9996 2362		247	100
		2598			2596		
110	3 5054		247	6 4958		247	110
		2845			2843		
120	3 2209		247	6 7801		247	120
		3092			3090		
130	2 9117		247	7 0891		248	130
		3339			3338		
140	2 5778		248	7 4229		247	140
		3587			3585		
150	1,0002 2191		247	0,9997 7814		247	150
		3834			3832		
160	1 8357		247	8 1646		247	160
		4081			4079		

TABLE DIRECTE Donnant distance sur l'ellipsoïde				TABLE DIRECTE Donnant distance sur la projection			
η_2	$\frac{1}{K} = \frac{D_{\text{ellipsoïde}}}{D_{\text{projection}}}$	Δ_1	Δ_2	$K = \frac{D_{\text{projection}}}{D_{\text{ellipsoïde}}}$	Δ_1	Δ_2	η_2
		-	-		+	+	
160	1,0001 8357			0,9998 1646			160
		4081			4079		
170	1 4276		246	8 5725		248	170
		4327			4327		
180	0 9949		246	9 0052		247	180
		4575			4574		
190	0 5437		248	9 46262		247	190
		4821			4821		
200	1,000 0553		246	0,9999 9447		247	200
		5068			5068		
210	0,9999 5485		247	1,0000 4515		248	210
		5351			5316		
220	9 0170		247	0 9831		247	220
		5561			5563		
230	8 4609		246	1 5394		247	230
		5808			5810		
240	7 8801		247	2 1204		247	240
		6055			6057		
250	0,997 2746		245	1,0002 7261		247	250
		6300			6304		
260	6 6446		247	3 3565		248	260
		6547			6552		
270	5 9899		246	4 0117		248	270
		6793			6800		
280	5 3106		247	4 6917		246	280
		7040			7046		
290	4 6066		245	5 3963		247	290
		7385			7293		
300	0,9993 8781		246	1,0006 1256		248	300
		7531			7541		
310	3 1250		246	6 8797		247	310
		7777			7788		

Mode d'emploi : On effectue comme d'habitude l'interpolation linéaire, mais il y a lieu de tenir compte du second ordre $1/2n(n-1) \Delta_2$ qui peut affecter la 7^{ème} décimale ; il est donné par l'abaque de la suivante ; il est toujours de signe contraire au terme de 2^{ème} ordre (+ pour la table directe, - pour la table inverse).

Annexe 6 : Tableau récapitulatif des comparaisons des deux méthodes d'acquisitions

Comparaison de la préparation	
Levé terrestre avec la Station Total	Levé aérien par drone
<ul style="list-style-type: none"> Documents nécessaires <ul style="list-style-type: none"> ☞ Carte ou plan ☞ Ordre de mission Étude de la zone à lever (relief, occupation du sol, ...) Choix des points d'appui Préparation des matériels 	<ul style="list-style-type: none"> Documents nécessaires <ul style="list-style-type: none"> ☞ Carte/orthophoto et plan ☞ Ordre de mission ☞ Droit de survol de la zone Etude de la zone à lever Choix des points de calage Préparation du plan de vol Préparation des matériels (batterie de recharge, drone en bon état de vol, ...) Installation du logiciel à utiliser Consultation du bulletin météorologique
Comparaison de la reconnaissance	
<ul style="list-style-type: none"> Renseignement sur la zone d'étude Vérification de l'existence et accessibilité des points d'appui Choix de l'emplacement des points de station Choix des détails à lever Etude du relief Vérification du passage et de l'intervisibilité des visées <p>Chef de mission : évalue les délais et coûts des travaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> Renseignement sur la zone d'étude Vérification de l'existence des points d'appui (point de référence) Choix et matérialisation des points de calage (points à la fois identifiables sur le terrain et sur les photos) <p>Chef de mission : évalue les délais et coûts des travaux</p>
Comparaison entre les matériels utilisés	
01 Station total avec accessoires 01 GPS bi fréquence 01 Ordinateur portable 01 Logiciel topographique (AUTOCAD-COVADIS) Moyens de communications	01 Drone avec accessoires 01 GPS bi fréquence 01 Ordinateur 01 Logiciel de traitement d'image (PIX4DMAPPER)
Comparaison entre les méthodes de mesure	
<ul style="list-style-type: none"> Etablissement des points d'appui : <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode différentielle (GPS) Transformation des coordonnées géographiques WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar Levé des points de détails : <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode par rayonnement : 	<ul style="list-style-type: none"> Levé des points de calage <ul style="list-style-type: none"> ☞ Méthode différentielle (GPS) Transformation des coordonnées géographiques WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar Prise de vue aérienne (mode continu)

mesures d'angle et de distances	
Comparaison entre les avantages et inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un plan topographique à petite et à grande échelle -Points d'appui dans un même système de coordonnées -Libre au choix de l'échelle -Levé altimétrique et planimétrique possible 	<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un plan topographique et d'une carte topographique à petite et à grande échelle -Acquisition possible pour les sites dangereux et inaccessibles -Faible coûts (personnel, matériel) par rapport à la méthode classique -Flexibilité et rapidité de la mise en place jusqu'à l'analyse des images -Moins cher, plus rapide et plus précis pour une zone de grande surface -Mise à jour facile de carte et de cadastre -Possibilité d'utilisation pour plusieurs applications (mise en évidence des zones affectées par l'érosion, détermination de la surface imperméable,...)
<ul style="list-style-type: none"> -Etablissement d'un polygonal de base au cas où on ne choisit pas la méthode différentielle -Existence des zones inaccessibles -Coûts des travaux élevés -Levé de détails demande plus de temps 	<ul style="list-style-type: none"> -Déformation au niveau de l'image -Nécessité de nombreux points de calage -Nécessité d'un beau temps

Comparaison du coût et délai

Levé terrestre par Station Total			Levé aérien par Drone		
Nature des opérations	Personnel utilisé			Personnel utilisé	Nombre de jour
	CB	O	T M		
Travaux de terrain : reconnaissance, pose des bornes	1	1	2 1	1	1
Levé des points d'appui par GPS (mode différentiel)	1	1		1	1
Levé par station total	1	1	2	1	Demi-journée
Travaux de bureau : transfert des données, calcul de Vo et des coordonnées des points, dessin, transformation des coordonnées géographiques en WGS84 en coordonnées Laborde Madagascar	1		1	1	2
Coût total en (Ariary)	55 170 000			19 854 000	

Annexe 7: Coordonnées des points à implanter

Station / Référence angulaire					
	Matricule	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Station	S.1	457716.624	671968.490	1561.990	
Référence V0	ref	457672.674	672469.014	0.000	

Points rayonnés					
Matricule	Angle (gr)	Distance (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
T.1	178.9426	122.036	457766.202	671856.979	1500.000
T.2	181.2141	118.326	457760.807	671858.723	1500.000
T.3	183.5902	115.684	457755.786	671859.637	1500.000
T.4	185.6183	114.146	457751.824	671859.908	1500.000
T.5	188.7093	112.804	457746.162	671859.622	1500.000
T.6	190.9464	112.494	457742.248	671858.953	1500.000
T.7	193.1880	112.712	457738.418	671857.906	1500.000
T.8	195.9968	113.757	457733.676	671856.019	1500.000
T.9	198.6334	115.625	457729.208	671853.552	1500.000
T.10	201.5059	118.925	457724.222	671849.808	1500.000
T.11	203.8997	123.188	457719.867	671845.345	1500.000
T.12	205.7631	128.223	457716.247	671840.267	1500.000
T.13	206.8862	132.778	457713.891	671835.740	1500.000
T.14	207.8420	139.266	457711.667	671829.312	1500.000
T.15	208.2342	146.580	457710.505	671822.038	1500.000
T.16	208.0709	153.370	457710.614	671815.238	1500.000
T.17	207.5998	158.921	457711.572	671809.649	1500.000
T.18	206.9488	163.751	457713.092	671804.777	1500.000
T.19	205.7926	169.841	457716.045	671798.650	1500.000
T.20	204.4870	174.977	457719.616	671793.538	1500.000
T.21	201.7922	182.614	457727.471	671786.199	1500.000
T.22	171.5083	110.167	457772.804	671873.724	1516.000
T.23	175.5321	103.204	457763.541	671876.567	1516.000
T.24	179.3748	99.081	457756.261	671877.683	1516.000
T.25	184.3120	95.952	457748.080	671877.841	1516.000
T.26	188.6037	94.689	457741.570	671877.146	1516.000
T.27	192.4583	94.544	457735.967	671875.946	1516.000
T.28	197.8549	95.899	457728.226	671873.296	1516.000
T.29	202.8061	98.990	457720.929	671869.594	1516.000
T.30	207.8050	104.688	457712.959	671863.866	1516.000
T.31	211.0426	110.768	457707.124	671858.131	1516.000
T.32	212.7973	115.574	457703.542	671853.659	1516.000
T.33	213.8123	119.217	457701.243	671850.270	1516.000
T.34	214.8849	124.566	457698.474	671845.253	1516.000
T.35	215.6933	130.910	457695.906	671839.230	1516.000
T.36	216.1483	139.857	457693.504	671830.558	1516.000
T.37	216.0670	146.402	457692.607	671824.072	1516.000

Matricule	Angle (gr)	Distance (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
T.38	215.6232	153.692	457692.468	671816.709	1516.000
T.39	214.6525	162.362	457693.553	671807.775	1516.000
T.40	213.2923	170.629	457695.993	671799.114	1516.000
T.41	212.1003	176.314	457698.586	671793.102	1516.000
T.42	210.4104	182.964	457702.743	671786.054	1516.000
T.43	208.5348	189.040	457707.840	671779.654	1516.000
T.44	205.4778	196.880	457716.927	671771.610	1516.000
T.45	168.9198	106.883	457774.822	671878.841	1518.000
T.46	171.2602	102.140	457769.053	671880.833	1518.000
T.47	174.1743	97.857	457762.959	671882.298	1518.000
T.48	179.7518	92.627	457753.175	671883.380	1518.000
T.49	185.6785	89.786	457744.232	671883.054	1518.000
T.50	192.0305	89.012	457735.421	671881.485	1518.000
T.51	197.7011	90.142	457727.746	671879.037	1518.000
T.52	202.9617	92.924	457720.439	671875.645	1518.000
T.53	207.0771	96.636	457714.345	671871.881	1518.000
T.54	209.7468	100.080	457710.072	671868.625	1518.000
T.55	213.0406	106.119	457704.209	671863.100	1518.000
T.56	215.0216	111.395	457700.156	671858.319	1518.000
T.57	216.8740	118.723	457695.664	671851.632	1518.000
T.58	217.7145	123.852	457693.151	671846.883	1518.000
T.59	218.3401	129.994	457690.734	671841.101	1518.000
T.60	218.6041	135.338	457689.120	671835.976	1518.000
T.61	218.5889	143.394	457687.517	671828.082	1518.000
T.62	218.2808	149.621	457686.962	671821.839	1518.000
T.63	217.5617	157.488	457687.148	671813.785	1518.000
T.64	216.7865	163.443	457687.990	671807.575	1518.000
T.65	215.5549	170.822	457689.957	671799.762	1518.000
T.66	214.4400	176.304	457692.155	671793.893	1518.000
T.67	212.8357	182.968	457695.804	671786.711	1518.000
T.68	211.2720	188.489	457699.781	671780.755	1518.000
T.69	209.5988	193.597	457704.398	671775.280	1518.000
T.70	208.0823	197.844	457708.836	671770.800	1518.000
T.71	206.4986	201.359	457713.705	671767.153	1518.000
T.72	159.3181	97.540	457781.424	671895.586	1529.000
T.73	162.9216	89.011	457771.899	671898.722	1529.000
T.74	166.8567	82.993	457764.045	671900.380	1529.000
T.75	172.5850	77.317	457754.922	671901.324	1529.000
T.76	177.7087	74.117	457748.041	671901.362	1529.000
T.77	183.4128	71.986	457741.182	671900.823	1529.000
T.78	191.5385	70.994	457732.151	671899.215	1529.000
T.79	198.6447	71.926	457724.439	671896.990	1529.000
T.80	205.2702	74.469	457716.981	671894.023	1529.000
T.81	210.3091	77.796	457710.845	671890.910	1529.000
T.82	213.2755	80.525	457706.909	671888.553	1529.000
T.83	217.1055	85.268	457701.265	671884.616	1529.000
T.84	221.0881	92.566	457694.291	671878.659	1529.000
T.85	223.9126	100.677	457688.025	671871.961	1529.000
T.86	225.3772	107.129	457683.837	671866.502	1529.000
T.87	226.2992	114.563	457679.986	671859.943	1529.000
T.88	227.0573	122.875	457675.944	671852.544	1529.000

Attention ! Les angles indiqués sont les lectures horizontales en mettant à zéro sur la référence.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Titre : ETUDE BIOLOGIQUE ET EVALUATION DES MENACES D'EXTINCTION DE DEUX PLANTES ENDEMIQUES DE MADAGASCAR : Aloe capitata quartziticola et Pachypodium brevicaule SUR LE MASSIF D'IBITY

Auteur : RANDRIANANDRASANA Tsiory Andrianina

Type : Mémoire de fin d'études

Nombre de pages : 60

Edition : Promotion 2010

Format PDF

[2] Titre : DYNAMIQUE SPATIALE DE L'ECOTOURISME DANS LE MASSIF DE L'IBITY, REGION VAKINANKARATRA

Auteur : RAZANAJATOVO Miangola

Type : Mémoire de fin d'études

Nombre de pages : 98

Edition : Promotion 2009

Format PDF

[4] Titre : ETABLISSEMENT D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE A PARTIR D'UNE IMAGE GOOGLE EARTH

Auteur : RAOILISON Lova

Type : Mémoire de fin d'études

Nombre de pages : 78

Edition : Promotion 2009

Lieu : Bibliothèque ESPA

[8] Titre : DOSSIER SPECIAL DRONE (partie DRONE)

Auteur : Flavien VIGUIER-Nicolas POLLET-Grégoire GOUSSU

Type : Magazine (Revue XYZ, aft « association française de topographie »)

Nombre de pages : 80

Edition : 4^e trimestre 2014

Lieu : En ma possession

[10] Titre : DOSSIER SPECIAL DRONE (partie DRONE)

Auteur : Nicolas FEHRENBACH

Type : Magazine (Revue XYZ, aft « association française de topographie »)

Nombre de pages : 80

Edition : 4^e trimestre 2014

Lieu : En ma possession

[14] Titre : LA LIMITE D'UTILISATION DE L'ORTHOPHOTO DANS LES TRAVAUX FONCIERS URBAINS

Auteur : RAKOTOARIMAHEFA Zanamiarintsoa Anjanirina

Type : Mémoire de fin d'études

Nombre de pages : 78

Edition : Promotion 2009

Lieu : Bibliothèque ESPA

[17] Titre : L'UTILISATION DES IMAGES SATELLITAIRES REPOND-ELLE AUX BESOINS DU CADASTRE A MADAGASCAR

Auteur : RAKOTOARISOA Naly-Zo Lalanirina

Type : Mémoire de fin d'études

Nombre de pages : 69

Edition : Promotion 2005

Lieu : Bibliothèque ESPA

[19] Titre : LE CONTROLE DE LA VEGETATION DANS LES EMPRISES FERROVIAIRES : UNE APPROCHE MULTI-SCALAIRE (partie TELEDETECTION)

Auteurs : Flavien VIGUIER-André PEREIRA-Fatoumata BAH-Christophe BERTHAUD-Pauline CAPRINI-Arnaud DURAND-Mathias STUDER-Benjamin HUGONET-ANTOINE Goineau-Léna MAATOUG

Type : Magazine (Revue XYZ, aft « association française de topographie »)

Nombre de pages : 84

Edition : 3^e trimestre 2015

Lieu : En ma possession

[19] Titre : DE L'ACQUISITION DES DONNEES A L'EXPLOITATION DE L'IMAGE SOLIDE (partie PHOTOGRAMMETRIE)

Auteurs : Antoine GOZE

Type : Magazine (Revue XYZ, aft « association française de topographie »)

Nombre de pages : 84

Edition : 3^e trimestre 2014

Lieu : En ma possession

WEBOGRAPHIE

[3] <http://www.google.com>

Titre : Mode d'emploi TC(R) 303/305/307

Auteur : LeicaGeosystems

Nombre de pages : 135

Format PDF

[5] [http:// ird.com /fr](http://ird.com/fr)

Titre : Système d'acquisitions de données GPS

Auteur : Francis BONDOUX

Nombre de pages : 29

Format PDF

[6] <http://www.altigator.com/fr>

Titre : Photogrammétrie, orthophotographies et orthoimages

Auteur : Altigator

Edition : 2016

Format Numérique

[6] <http://www.latitude drone.com>

Titre : LA MODELISATION 3D PAR DRONE PAR LA METHODE PHOTOGRAMMETRIQUE

Auteur : SARL LATITUDE DRONE

Edition : mars 2015

Format PDF

[6] <http://www.exametrics.fr>

Titre : Topographie aérienne

Auteur : Exametrics

Edition : 2013

Format Numérique

[7], [9] <http://www.federation-drone.org>

Titre : Les drones civils

Auteur : Fédération Professionnelle du Drone Civil

Edition : 2013

Format Numérique

[11] [http:// www.studiosport.fr](http://www.studiosport.fr)

Titre : Test du nouveau DJI Phantom 3 Professional

Auteur : Thomas

Edition : mai 2015

Format Numérique

[11] [http:// www.dji.com/fr/sitemap](http://www.dji.com/fr/sitemap)

Titre : Phantom 3 Professional - Laissez votre créativité s'envoler avec une caméra 4K dans les airs.

Auteur : DJI

Edition : 2016

Format Numérique

[11] <http://www.dji.com/product/phantom-3>

Titre : Phantom_ 3_ Professional _ Manuel de l'utilisateur v1.0_ fr

Auteur : DJI

Edition : avril 2015

Format PDF

[12] <http://www.axxess-solutions.com/photogrammetrie-drone-pix-4d.html>

Titre : PHOTOGRAMMETRIE DRONE

Auteur : Axxess-Solutions

Edition : 2016

Format Numérique

[12]<http://droneadventures.org/>

Titre : De l'acquisition à la visualisation d'images prises à partir d'un drone

Auteur : Arnaud Vandecasteele

Edition : avril 2014

Format Numérique

[13] <http://pix4d.com/>

Titre : Exigences du système: Minimum et recommandé ; matériel et spécifications du logiciel

Auteur : Pix4D

Edition : 2012-2016

Format Numérique

[15] <http://www.google.com>

Titre : Les gouvernes d'un avion

Auteur : L'avionnaire

Format Numérique

[16] <http://www.google.com>

Titre : La photographie aérienne

Auteur : Ernest VUILE

Format PDF

[18] <http://www.google.com>

Titre : Modèle Numérique de Terrain / d'Élévation

Auteur : Marc Bernard

Edition : 2009

Format Numérique

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	v
LISTE DES ANNEXES	vi
LISTE DE CARTE ET DES FIGURES	vi
LISTE DES ORGANIGRAMMES	vi
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES UNITES	viii
INTRODUCTION	1
I. Présentation de la zone objet de l'étude [1]	2
I.1. Situation géographique	2
I.2. Reliefs	2
I.3. Géologie et Géomorphologie [1]	3
I.4. Climat	4
I.5. Sol	7
CHAPITRE I. REALISATION D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE PAR STATION TOTAL	8
I. Généralités	8
I.1. Définition	8
I.2. Le principe de base	8
I.3. Les détails à lever	8
I.4. La précision du levé	8
I.5. Les mesures à effectuer	9
I.6. Méthodes et moyens de lever	9
II. Travaux préliminaires	10
II.1. Pré-reconnaissance	10
II.2. Etude préliminaire	10
II.3. Reconnaissance	11
III. Description des opérations sur terrain	16
III.1. Etalonnage	16
III.2. Ajustement	16
III.3. Déterminations des coordonnées des points de rattachement [4]	17
III.4. Méthodes d'observation des sommets	20

IV. Traitement des données	24
IV.1. Intégration des données.....	24
IV.2. Dessin	29
IV.3. Mise en page et édition du plan.....	29
IV.4. Coût de la mission	30
V. Organigramme de processus	32
CHAPITRE II : ETABLISSEMENT D'UN PLAN TOPOGRAPHIQUE A L'AIDE D'UN DRONE	33
I. Généralités	33
I.1. Définition	33
I.2. Les différentes fonctions de la photographie aérienne	33
I.3. La précision de la prise de vue aérienne	33
I.4. Les domaines d'utilisations	34
I.5. La méthodologie [6]	34
II. Historique et caractéristiques d'un drone	34
II.1. Historique du drone	34
II.2. Caractéristiques d'un drone	37
II.3. Présentation du logiciel utilisé	42
III. Processus de production d'un plan topographique ou d'une image à partir d'un drone	48
III.1. La chaîne de production du plan/image.....	48
III.2. Les travaux à effectuer	49
III.3. La prise de vue aérienne ou P.V.A.....	56
IV. Les différentes catégories d'images	66
IV.1. Les types	66
IV.2. Les avantages et inconvénients.....	67
IV.3. Contrôle avant intégration	68
IV.4. Les avantages et inconvénients des images (orthophotographie) produites par un drone et les moyens humains.....	68
V. Analyse du coût et délai de la création du plan / images.....	69
VI. Organigramme de processus	74
CHAPITRE III. COMPARAISON DES DEUX METHODES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE 75	75
I. Comparaisons.....	75
I.1. Superposition des deux résultats	76
I.2. Comparaison de la méthodologie	77
I.3. Etude comparative du coût et délai d'exécution	79

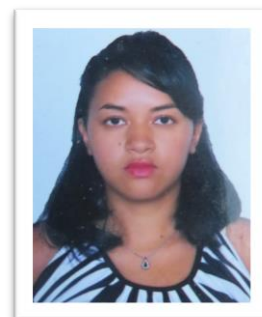
I.4. Limite d'utilisation d'un drone	80
II. Interprétation.....	82
III. Perspectives de recherche	83
III.1. Plan de comparaison	83
III.2. Technique d'implantation	83
III.3. Calcul de Cubature	86
III.4. Prévision dans 1an.....	87
IV. Recommandations	88
CONCLUSION	89
ANNEXES.....	A
I. Historique et politique globale de Holcim Madagascar	B
I.1. Historique	B
I.2. Politique globale	C

Auteur : RASANDY Toandro Kanto

Adresse : Lot II B 53 Faravohitra- Antananarivo 101

Contact : 033 14 820 59

E-mail : rtoandro@gmail.com



Titre du mémoire

« LEVER AERIEN PAR DRONE COMPARE AU LEVER TERRESTRE PAR STATION TOTAL »

Nombre de pages : 89

Nombre de tableaux : 33

Nombre de figures : 15

Nombre de photos : 10

RESUME

Ce mémoire a été fait dans le but de voir les intérêts et la maîtrise d'un drone pour la réalisation d'un plan topographique, ceci dans le plus bref délai et avec un coût économique moins cher.

Les différentes méthodes d'acquisitions des données utilisées depuis toujours présentent quelques failles basées principalement sur leurs coûts trop chers et la lenteur de son exécution.

L'utilisation d'un drone présente un intérêt tout particulier pour plusieurs travaux. En fait, le drone est utilisé ici pour établir un plan topographique au 1/2000 sur une zone de très grande surface. Toutefois, notre étude concerne l'utilisation d'un drone possédant une résolution des pixels de 12méga. En d'autres mots, nous avons fait une orthophotographie, la précision de cette orthophoto est directement proportionnelle à la résolution de l'image prise par l'appareil photo numérique embarqué.

Des études comparatives ont été faites, et cela nous a permis de délimiter les domaines d'utilisation de chaque appareil utilisé et de réaliser que les drones offrent la possibilité d'effectuer des relevés de carrière d'une manière précise, sûre et économique.

En somme, le système drone est un excellent outil permettant d'aider à la planification et au suivi de chantier.

Mots clés : Drone, Orthophotographie numérique, Photogrammétrie, GPS, Modèle Numérique du Terrain, Modèle Numérique d'Élévation, Lever topographique, Point de calage, Pixel, Correction

ABSTRACT

This memoire has been made in the goal to see the interests and the mastery of a drone for the realization of a topographic plan, this in the briefest delay quickly and with a less expensive economic cost.

The different methods of acquirements of the data used since present some based failles always mainly on their too expensive costs and the slowness of his execution.

The use of a drone presents an interest all particular for several works. In fact, the drone is used here to establish a topographic plan at 1/2000 on a zone of very big surface. However, our survey concerns the use of a drone possessing a resolution of the pixels of 12méga. In other words, we made an orthophotographie, the precision of this orthophoto is directly proportional to the resolution of the picture taken by the embarked numeric camera.

Some comparative studies have been made, and it allowed us to delimit the domains of use of every device used and to achieve that the drones offers the possibility to do summaries of career in a precise, sure and economic manner.

In short, the system drone is an excelling tool permitting to help to wards the scheduling and the follow-up of yard.

Key words: Drone, numeric Orthophotographie, Photogrammetrie, GPS, *Digital Terrain Model*, *Digital Elevation Model*, Topographic survey, Point of wedging, Pixel, Correction.

Directeurs de mémoire : Dr. RABETSIHINY

Mr. RANDRIAMALAZARIVO Léo Elysé