



Université Ammar Telidji - Laghouat
Faculté d'architecture et de génie civil
Département du Génie civil



Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Master académique : sciences et techniques topographiques

Présenté par :

OUESLATI Mohamed Amine

Intitulé :

***L'application de la photogrammétrie rapprochée dans
les travaux topographiques***

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

<i>M. KADRI Chadli :</i>	<i>Maitre-Assistant (A)</i>	<i>Président</i>
<i>M. GUERROUDJ Abed Elhalim :</i>	<i>Maitre-Assistant (A)</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. DJABALLAH Ahmed:</i>	<i>Maitre-Assistant (A)</i>	<i>Encadrant</i>

Introduit dans la coopération éducative de l'année 2016, Tunisie - Algérie

Année Universitaire : 2017 - 2018

Remerciements

*En premier lieu, je tiens à remercier toute l'équipe de l'entreprise **BU.T**, pour m'avoir accueilli au sein de leur entreprise, ainsi que pour m'avoir accordé sa confiance et guider lors du projet de fin d'études.*

Mes sincères remerciements ainsi que toute ma gratitude s'adressent à mon encadreur M. Djaballah Ahmed pour leurs fructueux conseils et le soutien moral qu'ils m'ont apporté...

Je tiens aussi à remercier les membres de jury M. Guerroudj abed elhalim d'avoir s'intéresser à notre sujet et participer au jury de notre soutenance.

*C'est avec un grand plaisir que nous exprimons notre reconnaissance à
M. Kadri Chadli de présider les membres de jury*

Merci à tous ceux qui ont rendu ma vie étudiante vraiment super pendant ces 5 années, depuis la licence à l'FST jusqu'à le master. Ça fait beaucoup de gens donc vous ne m'en voudrez pas de ne pas tous vous citer.

J'adresse mes sentiments les plus distingués à ma mère NAÏMA et à mon père Amor qui ont consacré leur vie à veiller à notre bonheur.

Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude nos enseignants de L'Université Amar Thelidji

Résumé :

Dans le but d'une simplification et d'optimisation en cout et en temps dans les travaux topographique tel que l'inspection et de calcul de volume la photogrammétrie rapproché (terrestre) semble la plus répandue, à cet effet ce travail rentre dans l'application de la photogrammétrie rapproché aux travaux topographiques.

Afin d'arrivé à s'exécuté cette technique une automatisation de la mission de stéréo-préparation par le développement d'une extension PLM6.6, pour l'élaboration du tableau d'assemblage avec les différentes paramètres de cette mission qui sera utilisé dans l'inspection d'un silo de stockage pour déterminé leurs déformations géométrique ; et le calcul du volume d'un stock d'agregats.

Mots clés : photogrammétrie terrestre, calibrage, stéréo-préparation, modélisation en 3D, inspection.

ملخص

من أجل تخفيض الأعباء واختصار الوقت في الأشغال الطبوغرافية، كأشغال المتابعة وحساب الأبعاد، نجد أن التصوير المساحي الأرضي يعد الأكثر استعمالاً، لذلك يندرج هذا العمل ضمن تطبيق التصوير المساحي الأرضي في الأشغال الطبوغرافية.

من أجل تنفيذ هذه التقنية، قمنا ببرمجة تطبيق PLM6.6 ليقوم بالحساب الآلي لجميع العوامل المتداخلة في المرحلة التحضيرية وتصميم جدول التجميع المقترح بكافة معلومات هذه المهمة، والتي سيتم استعمالها في أشغال متابعة صوامع التخزين من أجل تحديد التشوهات الهندسية، بالإضافة إلى استعمالها في حساب حجم مخزون من البصى.

الكلمات الرئيسية: التصوير المساحي الأرضي، المعايرة، الجسم التحضيري، تصميم ثلاثي الأبعاد،

Liste des figures

Figure 1 : organigramme des différents types de la photogrammétrie	4
Figure 2 : Schéma simplifié d'un appareil photographique	6
Figure 3 : Différents réglages de l'ouverture.....	6
Figure 4 : Une représentation dans l'approximation de Gauss	8
Figure 5 : Principe d'une distance focale.....	9
Figure 6 : Camera non-SRL	11
Figure 7 : Camera SLR.....	11
Figure 8 : calibrage par grille.....	22
Figure 9 : calibrage par polygonal.....	22
Figure 10 : résultat distorsion tangentiel de camera	23
Figure 11 : résultat distorsion radial de camera	24
Figure 12 : résultat de calibrage.....	24
Figure 13 : échiquier d'étalonnage.....	24
Figure 14 : Ouverture angulaire (FOV)	26
Figure 15 : Image explicative de la résolution spatiale.....	27
Figure 16 : Différentes paramètres de recouvrement.....	28
Figure 17 : Principe de recouvrement longitudinal.....	29
Figure 18 : Principe de recouvrement latéral	29
Figure 19 : Les différents paramètres de prise de vues aérien	30
Figure 20 : Méthode standard d'acquisition terrestre	31
Figure 21 : Méthode convergente d'acquisition terrestre	31
Figure 22 : Résultat taille d'image sur terrain par la première méthode.....	34
Figure 23 : Résultat taille d'image sur terrain par la deuxième méthode.	35
Figure 24 : Calcul du paramètre de recouvrement.....	36
Figure 25 : Interface de calcul nombre photos et la génération des dessins	36
Figure 26 : Dessin automatique de la scène à observer	36
Figure 27 : Tableau d'assemblage de la mission de prise de vues.....	37
Figure 28 : l'interface de stéréo-préparation pour une scène circulaire.....	38
Figure 29 : Tableau d'assemblage de la mission de prise de vues d'une scène circulaire.....	39
Figure 30 : codes sources d'un rectangle	39
Figure 31 : code sources de style ligne	40
Figure 32 : codes sources d'un bloc.....	40
Figure 33 : Prise de vue pour la vérification des calculs	41
Figure 34 : Mesure de la planche de calibrage.....	41
Figure 35 : Capture d'écran pour la dimension d'image sur Autocad	42
Figure 36 : La taille de l'image calculée par l'extension PLM 6.6.....	42
Figure 37 : Logo Agisoft.....	43
Figure 38 : Logo 3DReshaper.....	43
Figure 39 : GPS GEOMAX	43
Figure 40 : Résultat détection des points homologue par Agisoft	47
Figure 41 : Localisation de l'objet à inspecté	50
Figure 42 : Résultat théorique de la mission de prise de vue.....	52
Figure 43 : Résultat graphique du modèle de la mission de prise de vues	52
Figure 44 : le silo de stockage.....	53
Figure 45 : Calibration de la camera sous Agisoft.....	54
Figure 46 : Boite de dialogue d'alignement des photos sous Agisoft.....	55

Figure 47 : le résultat d'alignement des photos	55
Figure 48 : paramètre de qualité des photos sur Agisoft.....	56
Figure 49 : Dialogue pour construire un nuage dense sous Agisoft	56
Figure 50 : Résultat de construction d'un nuage dense sous Agisoft	57
Figure 51 : Liste des points repères et barre d'échelle sous Agisoft.....	58
Figure 52 : Points repères implantés sur un nuage dense sous Agisoft	58
Figure 53 : Dialogue de construction d'un maillage.....	59
Figure 54 : Résultat de construction du maillage 3D.....	60
Figure 55 : Dialogue pour construire un modèle tuilé sous Agisoft	60
Figure 56 : Résultat de construction du modèle tuilé.....	61
Figure 57 : les quatre faces du modèle sur 3DReshaper	61
Figure 58 : Les quatre faces du modèle	62
Figure 59 : Dialogue d'extraction de meilleur cylindre	62
Figure 60 : Dialogue pour les paramètres d'extraction du meilleur cylindre	63
Figure 61 : Le résultat d'extraction du meilleur cylindre	64
Figure 62 : Une virole du silo de stockage.....	64
Figure 63 : Dialogue des paramètres de réglage du l'inspection	64
Figure 64 : Classification de résultat.....	65
Figure 65 : le résultat d'inspection avec quelques étiquettes sur les bordures d'assemblage.....	66
Figure 66 : le résultat d'inspection pour les quatre faces.....	66
Figure 67 : Mesure de la bordure d'assemblage	66
Figure 68 : dialogue de création d'une projection en 2D sous 3DReshaper	67
Figure 69 : Résultat d'inspection projeté en 2D	67
Figure 70 : Dialogue de paramétrage pour le sectionnement.....	68
Figure 71 : Classification pour coupes circulaires	68
Figure 72 : Résultat des coupes circulaires à chaque 1m d'hauteur	69
Figure 73 : Coupe horizontale à 1m.....	70
Figure 74 : Coupe horizontale à 2m.....	70
Figure 75 : Coupe horizontale à 3m.....	71
Figure 76 : Coupe horizontale à 4m.....	71
Figure 77 : Les corps superflu de notre silo de stockage	72
Figure 78 : Coupe horizontale à 5m.....	72
Figure 79 : Dialogue de paramétrage	73
Figure 80 : Paramètres de classification.....	73
Figure 81 : Résultat d'inspection de la verticalité.....	74
Figure 82 : La base de silo sui est en ciment	74
Figure 83 : Le résultat d'inspection de la verticalité pour chaque coupe	75
Figure 84 : Vérification des pics sur une section verticale	76
Figure 85 : L'échenillant de l'expérience (le volume à calculer)	77
Figure 86 : Mesure d'hauteur du cône de sable	78
Figure 87 : Mesure du diamètre du cône de sable.....	78
Figure 88 : Résultat nuage des points	78
Figure 89 : Résultat maillage 3D.....	78
Figure 90 : Mise à l'échelle de l'objet	79
Figure 91 : Résultat de calcul volume.....	79
Figure 92 : Localisation de la zone d'étude (Carrière SOMATP)	80
Figure 93 : Résultat théorique de la mission de prise de vue.....	82
Figure 94 : Résultat graphique du modèle de prise de vues (objet circulaire).....	82

Figure 95 : Calibrage de camera sous Agisoft	84
Figure 96 : Calibrage et mise en position des camera sous Agisoft	85
Figure 97 : Résultat de construction d'un nuage dense sous Agisoft	85
Figure 98 : Liste point repère et barre d'échelle sous Agisoft	86
Figure 99 : Point repère implanté sur un nuage dense sous Agisoft	86
Figure 100 : Résultat de construction du maillage 3D.....	86
Figure 101 : Création de la ligne de coupure sur le modèle 3D.....	87
Figure 102 : Extraction du modèle de stock	87
Figure 103 : Résultat de volume calculé sur le modèle	88
Figure 104 : Mission de levé topographique (GPS).....	88
Figure 105 : Résultat levé par GPS	89
Figure 106 : Importation des coordonnées levées sur Autocad	90
Figure 107 : MNT1	90
Figure 108 : MNT2.....	90
Figure 109 : Résultat volume de stock par méthode topographique.....	90
Figure 110 : Superposition de la ligne de coupure du levé avec le modèle 3D	91
Figure 111 : Résultat de calcul du volume.....	92

Liste des tableaux

Tableau.1 : les différentes tailles des capteurs	9
Tableau.2 : comparaison entre la photogrammétrie rapprochée et l'aérienne	15
Tableau.3 : réglage de l'information radiométrique sur une caméra numérique	25
Tableau.4 : Paramètres géométrique de l'image	28
Tableau.5 : Caractéristiques de la camera Samsung ES60	44

Liste des abréviations

MNT : Modèle Numérique de Terrain
MNS : Modèle Numérique de Surface.
FOV: Field Of View.
CCD: Charged Coupled Device.
DTC : Dispositif à Transfert de Charges
AWB: Automatic White Balance
SLR: Single-Lens Reflex
SIFT: Scale-Invariant Feature Transform
SFM: Structure From Motion.
Brep: Boundary Representation (représentation des bords).
CSG: Géométrie Constructive du Solide.
PPS : Point Principal de Symétrie.
PPA : Point Principal d'Autocollimation.
EXIF : Exchangeable Image File Format.
GPS: Global Positioning System.
GCP: Ground Control Point.
CAO : Conception Assistée par Ordinateur.
GNSS: Global Navigation Satellite System.
RTK: Real Time Kinematic.
NRTK: Network Real Time Kinematic.
GSM: Global System for Mobile communication.
SIFT: Scale-Invariant Feature Transform.
SURF: Speeded Up Robust Feature.
SFM: Structure from motion
RANSAC: RANdom SAmple Consensus.
CED: Corrélation Epipolaire Dense.
MVS: Multi View Stereo.
OTC : L'Office TUNISIEN de Topographie et du Cadastre.
ADS : Airborne Digital Sensor

Table des matières

<i>Remerciements</i>	i
Résumé.....	ii
<i>Liste des figures</i>	iii
<i>Liste des tableaux</i>	v
<i>Liste des abréviations</i>	vi
Table des matières.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Aperçue sur la photogrammétrie	2
I.1. Définition de la photogrammétrie	3
I.2. Historique de la photogrammétrie.....	3
I.3. Les différents types de la photogrammétrie	4
I.3.1. Images terrestres, aériennes et spatiales	4
I.3.2. Traitements analogique, analytique et numérique	5
I.3.3. Géométrie conique et cylindro-conique.....	5
I.4. Notions de photographie	5
I.4.1. Composition d'un appareil photo	5
I.4.2. Aspects radiométrique	6
I.4.2.1. Exposition.....	6
I.4.2.1.1. Ouverture	6
I.4.2.1.2. Temps d'exposition	7
I.4.2.1.3. Sensibilité ISO	7
I.4.2.1.4. Mesure et modes d'exposition	7
I.4.2.2. Balance des blancs.....	7
I.4.3. Aspects Géométrique.....	8
I.4.3.1. Lois générale et termes.....	8
I.4.3.2. L'objectif photographique.....	10
I.4.4. Chambre photographique.....	10
I.4.4.1. Les chambres métriques	10
I.4.4.2. Les chambres non métriques	11
I.5. Notions photogrammétrique	12
I.5.1. Couple stéréoscopique	12
I.5.2. Mise en place d'un couple stéréoscopique	12
I.5.2.1. L'orientation externe	12

I.5.2.2.	L'orientation interne.....	12
I.5.2.3.	Orientation automatique d'un couple stéréoscopique	13
I.5.3.	Restitution.....	13
I.6.	La photogrammétrie terrestre et aérienne	15
I.7.	Logiciels de photo-modélisation.....	16
I.7.1.	Solution web	16
I.7.2.	Les solutions payantes	17
I.7.3.	Les solutions open source	18
I.8.	La photogrammétrie et leur application topographique	18
I.8.1.	Cadastre	18
I.8.2.	Auscultation.....	18
I.8.3.	Calcul des volumes	19
I.8.4.	Levée topographique	19
Chapitre II : Travaux de préparation.....		20
Introduction.....		21
II.1.	Etalonnage de l'appareil photo	21
II.1.1.	Appréciations aux distorsions.....	21
II.1.1.1.	Distorsion radiales.....	21
II.1.1.2.	Distorsions tangentielles.....	21
II.1.1.3.	Distorsions affines.....	21
II.1.2.	Processus d'étalonnage	22
1^{er} Partie : Les théories		25
II.1.	Qualités de la prise de vues.....	25
II.1.1.	Qualité radiométrique	25
II.1.2.	Qualité géométrique.....	26
II.1.2.1.	L'ouverture angulaire de camera.....	26
II.1.2.2.	Résolution spatiale de l'image	26
II.1.2.3.	Taille de l'image.....	27
II.1.3.	Recouvrement des photographies	28
II.2.	Technique de prise de vue.....	31
II.2.1.	Photogrammétrie aérienne	31
II.2.2.	Photogrammétrie terrestre	31
II.2.2.1.	Cas standard (Parcours linéaire).....	31
II.2.2.2.	Cas convergent	31
II.2.2.3.	Scènes complexes.....	31
II.3.	Mise à l'échelle	32

2^{ème} Partie : L'application des théories	33
II.1. Besoin de développement	33
II.3. Les différentes tâches de l'extension PLM6.6 (pour les scènes à une seule face)	33
II.3.1. Calcul de surface observée	33
II.3.2. Calcul des paramètres de recouvrement	35
II.3.3. Création du tableau d'assemblage	36
II.4. Les différentes tâches de l'extension PLM6.6 (pour les scènes circulaires)	37
II.4.1. Calcul de distance d'éloignement	37
II.4.2. Calcul de la taille d'image sur terrain	37
II.4.3. Calcul de nombre de bande	38
II.4.4. Calcul de la base stéréoscopique	38
II.4.5. Dessin des résultats	38
II.5. Quelques codes source de l'extension VBA-Autocad	39
II.6. Vérification de l'extension PLM6.6	41
II.6.1. Matériel utilisé dans l'expérience	41
II.6.2. Méthodologie	41
II.6.3. Conclusion	42
II.7. Logiciels et Matériels à utiliser	43
II.7.1. Logiciels	43
II.7.1.1. Agisoft PhotoScan	43
II.7.1.2. 3DReshaper	43
II.7.2. Matériels	43
II.7.2.1. GPS GeoMax Zenith25	43
II.7.2.2. Caméra numérique	44
II.8. Conclusion	44
Chapitre III : Les travaux topographiques de projet	45
Organigramme du traitement photogrammétrique par les logiciels de photo-modélisation	46
1^{er} Partie : Procédures de traitement	47
III.1. Introduction	47
III.2. Méthodes développées pour la détection	47
III.3. Les orientations photogrammétriques	48
III.3.1. Calcul de la matrice fondamentale	48
III.3.2. Orientation interne	48
III.3.3. Orientation externe	48
III.4. Reconstruction de surface dense	49
III.4.1. Corrélation dense	49

III.5.	Maillage 3D.....	49
2^{ème} Partie : Travaux d'inspection		50
III.1.	Définition de l'intervention	50
III.2.	Définition de l'objet a inspecté	50
III.3.	Préparation de prise de vues	51
III.3.1.	Reconnaissance de terrain.....	51
III.3.2.	Préparation bureau	51
III.3.2.1.	Préparation de matériel	51
III.3.2.2.	Préparation du plan de la mission.....	51
III.3.2.3.	Les résultats	51
III.4.	Mission de prise de vues	53
III.5.	Traitement des données	54
III.5.1.	Sous Agisoft PhotoScan.....	54
III.5.1.1.	Calibration de la camera	54
III.5.1.2.	Alignement des photos	54
III.5.1.3.	Nuage de points dense	56
III.5.1.4.	Mise à l'échelle du nuage de points.....	58
III.5.1.5.	Création de maillage tridimensionnel.....	59
III.5.1.6.	Création du modèle tuilé.....	60
III.5.1.7.	L'extraction des résultats.....	61
III.5.2.	Sous 3DReshaper	61
III.5.2.1.	Importation et mise en position du modèle.....	61
III.5.2.2.	Création de meilleur cylindre	62
III.5.2.3.	L'inspection du silo de stockage.....	64
III.5.2.4.	Carte d'inspection.....	67
III.5.2.5.	Les coupes horizontales.....	68
III.5.2.6.	Les coupes verticales	73
III.6.	Conclusion.....	76
3^{ème} Partie : Calcul volume		77
III.1.	Introduction	77
III.2.	Test expérimental	77
III.2.1.	La mesure de volume manuellement	77
III.2.2.	Traitement sur logiciels.....	78
III.2.3.	Conclusion	79
III.3.	Localisation de zone d'étude	80
III.4.	Préparation de prise de vue	81

III.4.1.	Reconnaissance de terrain	81
III.4.2.	Préparation bureau	81
III.4.2.1.	Préparation du matériel	81
III.4.2.2.	Préparation du plan de mission	81
III.4.2.3.	Les résultats	81
III.5.	Matériels utilisés	83
III.6.	Mission d'acquisition des photos	83
III.7.	Traitement des données (photographies)	84
III.7.1.	Sous Agisoft	84
III.7.1.1.	Calibrage de camera	84
III.7.1.2.	Alignement des photos	84
III.7.1.3.	Création de nuage dense	85
III.7.1.4.	Mise à l'échelle	86
III.7.1.5.	Création de maillage 3D	86
III.7.2.	Sous 3DReshaper	87
III.8.	Calcul volumétrique par la méthode topographique	88
III.8.1.	Levé topographique	88
III.8.1.1.	Mode d'utilisation de GPS	89
III.8.2.	Création des modèles numériques de terrain	89
III.9.	Optimisation d'erreur de calcul volume	91
III.9.1.	Interprétation	92
III.10.	Conclusion	92
	<i>Conclusion générale</i>	93
	<i>Références Bibliographique</i>	95
	<i>Webographie</i>	96

Introduction générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'étude en Master académique en Sciences et Techniques Topographiques, à l'université AMMAR THLIJI Laghouat, d'après une coopération éducative entre la Tunisie et l'Algérie.

Depuis leur naissance la photogrammétrie a été monopolisée par les départements de défense dans le monde et par quelques applications civile très limité avant les années de 2000. Au cours de la dernière décennie, et grâce aux avancées technologiques, la photogrammétrie a connu une grande évolution au niveau du matériel et des logiciels utilisés.

L'objectif de ce projet s'articule sur l'apport de la photogrammétrie terrestre déjà utilisé en archéologie, architecture, vision en 3D et visite virtuel aux applications topographiques tel que : les travaux d'inspection, d'auscultation et de calcul de volume.

L'acquisition photogrammétrique nécessite un respect de quelques règles expliqué dans ce rapport ainsi qu'une maîtrise technique de certains réglages photographiques. Afin de garantir la précision de la reconstruction 3D, il est nécessaire de prendre en compte différents paramètres lors de la prise de vues. Pour cela on a développé une solution informatique sous VBA-Autocad qui va préparer les travaux de stéréo-préparation (calcul des paramètres nécessaire avec le dessin de tableau d'assemblage de prise de vues).

Ensuite deux levés photogrammétriques seront réalisés, une première application photogrammétrique sur un silo de stockage inclus dans les travaux d'inspection des ouvrages. Et une deuxième comparer le levé photogrammétrique avec un levé topographique par GPS d'un stock de matériaux de 0/3 (mélange de sable et de graviers).

À la fin de celui-ci certaines remarques seront formulées, concernant les méthodes d'acquisition, traitements et le contrôle des résultats.

A ce contexte notre mémoire est organisé comme suit :

- Un premier chapitre développe les notions théoriques de la photogrammétrie, pour donner une initiation théorique sur le domaine.
- Un deuxième chapitre est consacré pour les travaux préparatoires des levés photogrammétriques, touchant les travaux de stéréo-préparation tel que : l'étalonnage de la caméra utilisée et le tableau d'assemblage, qui seront calculés automatiquement par le biais d'une application **VBA-AUTOCAD**, que nous l'avons développée.
- Dans le troisième chapitre, l'organigramme suivi durant nos travaux suivi par les différents traitements effectués par les logiciels seront évoqués, et finalisé par deux applications de la photogrammétrie terrestre aux travaux topographiques.

Chapitre I :

Aperçue sur la photogrammétrie

I.1. Définition de la photogrammétrie

L'art de la photogrammétrie, apparaît depuis 1849 avec l'officier de l'armée française Aimé Laussedat, l'origine de cette dernière due par le malaxage de ces termes grecs ; photo « lumière », graphein « écrire » et metria « mesure ». [ARTICLE PARU DANS LA REVUE GEOMATIQUE (2002), VOL. 29, NO. 2, PP. 8-9.]

Nous pouvons définir la photogrammétrie comme toute technique de mesure qui permet de modéliser un espace 3D en utilisant deux images photographiques (ou plus) prises à partir de positions différentes, pour but de définir la position dans l'espace, la forme et les dimensions d'un objet.

Dans cette technique, les points communs sont identifiés sur chaque image. Une ligne de vue (ou rayon) peut être construite de la position de l'appareil photographique au point de l'objet. C'est l'intersection de ces rayons (triangulation) qui détermine la position tridimensionnelle du point. [F. GERVAIX, 2010]

Au fur et à mesure de son évolution, la photogrammétrie s'est vue utilisée dans de multiples domaines d'application (topographie, cartographie, géologie, archéologie, architecture...)

I.2. Historique de la photogrammétrie

En terme chronologique l'évolution de la photogrammétrie d'une phase à un autre d'environ 20 ans. On est passés successivement de la photogrammétrie analogique à la photogrammétrie analytique pour aboutir la photogrammétrie numérique, Ces transitions dues à l'évolution de la technologie des capteurs et l'évolution informatique au niveau des matériels et les méthodes de traitement.

La photogrammétrie analogique s'est beaucoup développée en temps de guerre où la nécessité de faire une carte des pays était primordiale, à l'aide des instruments purement mécaniques et optiques, elle a cours jusqu'en 1970. [[HTTP://PHOTO.INSA.FREE.FR](http://photo.insa.free.fr)]

Lors de développements de l'informatique les systèmes de mesure deviennent pilotés par ordinateur et les images demeurent argentiques, ce qui présente la photogrammétrie analytique. On mesure alors les coordonnées sur la photographie et on les transforme en coordonnées 3D sur les premiers écrans alphanumériques jusqu'en 1990. [[HTTP://PHOTO.INSA.FREE.FR](http://photo.insa.free.fr)]

Les premières images numériques font leur apparition en 1992, les ordinateurs ou stations de travail deviennent de plus en plus puissants et peuvent traiter un nombre toujours plus grand de pixels. On passe pour une nouvelle génération c'est la photogrammétrie numérique, qu'il est en train de développer rapidement jusqu'à nos jours. [[HTTP://PHOTO.INSA.FREE.FR](http://photo.insa.free.fr)]

I.3. Les différents types de la photogrammétrie

On peut classifier les applications photogrammétriques selon plusieurs critères : l'origine des images, le mode de traitement utilisé ou la géométrie. Néanmoins, cette classification reste subjective. En effet, grâce au besoin de l'utilisateur et à l'essor technologique et méthodique.

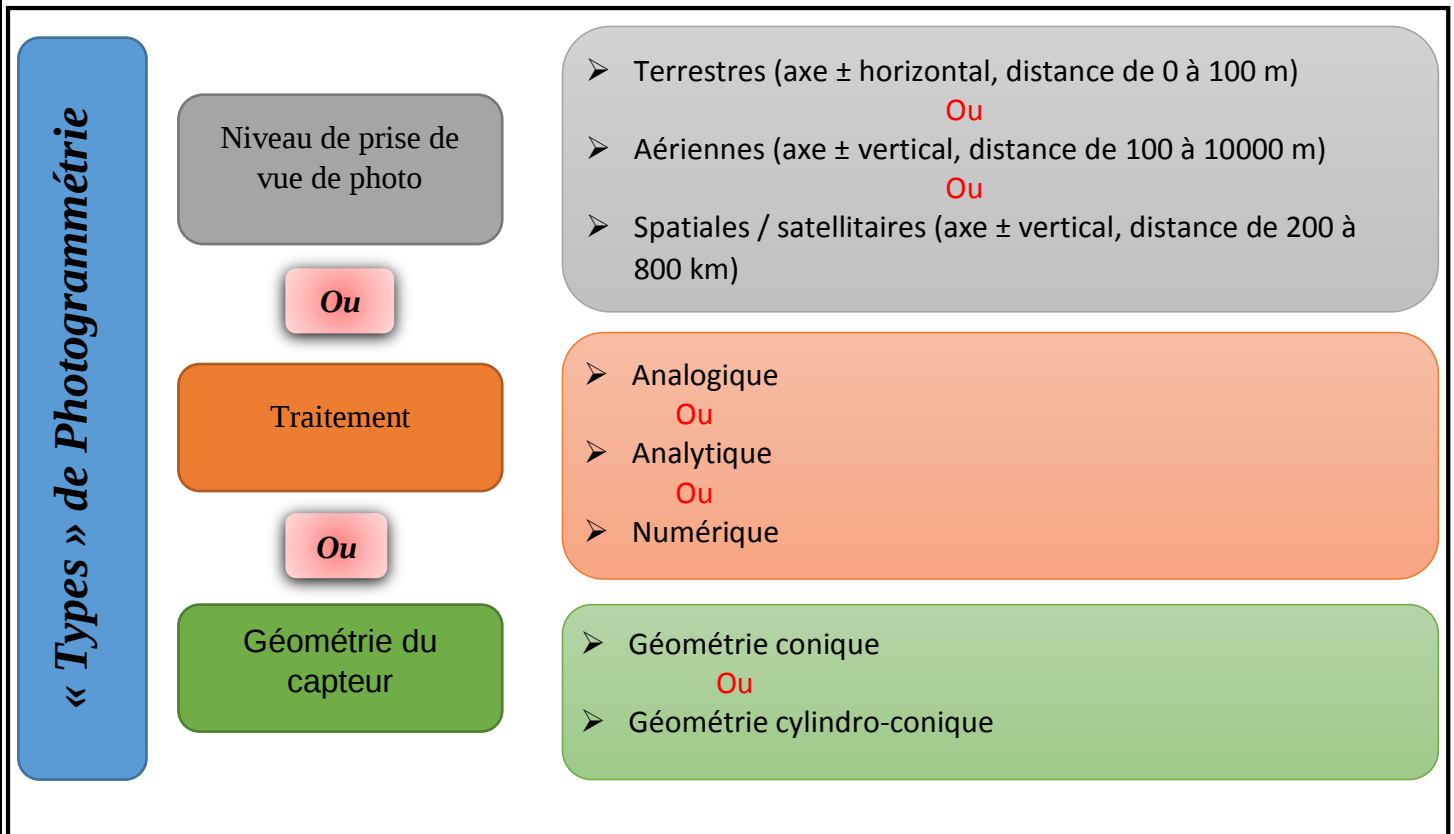


Figure 1 : organigramme des différents types de la photogrammétrie

I.3.1. Images terrestres, aériennes et spatiales

En photogrammétrie, l'acquisition des données photographiques se fait soit par les satellites, des véhicules aériens ou bien des prises de vue terrestres. La différence la plus immédiate est certainement la résolution géométrique (taille réelle du pixel).

Le choix de la plateforme dépend bien entendu de l'application, de l'échelle de travail, du budget,...

Les images terrestres se différencient des autres principalement par la direction de la prise de vue qui est en général horizontale (ou proche de l'horizon) alors que les images aériennes et spatiales sont verticales.

Les images spatiales se différencient des autres principalement par leur largeur de champ qui est très étroite ($\text{FOV} \approx 1^\circ$), alors que les images terrestres et aériennes sont beaucoup plus larges (FOV 60 à 120°). [F. GERVAIX, 2010]

I.3.2. Traitements analogique, analytique et numérique

Le traitement analogique des photographies existe depuis l'origine de la photogrammétrie (début du XXème siècle). Beaucoup d'appareils ont dépassé les vingt ans de service ! Ces instruments extrêmement complexes permettaient de recréer la position et l'orientation des photos au moment de la prise de vue. C'était des instruments essentiellement mécaniques et optiques.

Le traitement analytique des photographies a débuté aux années 1970. La position et l'orientation des photos étaient recrées par des formules mathématiques traitées par ordinateur.

Le traitement numérique des photographies est apparait dès le début des années 1990 jusqu'à nos jours-là. L'évolution informatique par l'utilisation des photos numériques traitées directement sur un ordinateur à l'aide des différentes gammes des logiciels. [F. GERVAIX, 2010]

I.3.3. Géométrie conique et cylindro-conique

La géométrie conique est la géométrie traditionnelle des prises de vues discrètes et séquentielles. Ont essayé de dupliquer les caméras analogiques en remplaçant le film par un support numérique, par une matrice de **CCD** (Charged Coupled Device). C'est qui s'est fait systématiquement avec les appareils photos populaire.

La géométrie cylindro-conique est la géométrie des capteurs linéaires (à barrettes de « **CDD** en français est **DTC** »), très utilisés par les satellites (Landsat, Spot, Ikonos, ...) et de nombreux capteurs de télédétection, pour une prise de vue continue. Plus récemment, cette géométrie a été adoptée pour le capteur aérien de Leica (Leica Geosystems ADS). [F. GERVAIX, 2010]

I.4. Notions de photographie

Théoriquement, tout type d'appareil photo numérique permet de réaliser une acquisition photogrammétrique. Pour autant, le besoin de maîtriser les différents réglages est d'obtenir une qualité d'image adaptée par la compréhension de paramètres et ces aspects fondamentaux :

I.4.1. Composition d'un appareil photo

Un appareil photographique est un instrument permettant l'enregistrement de vues 2D d'objets (photographies), il est composé par :

- ✚ Un **objectif**, système optique convergent, formé par plusieurs lentilles
- ✚ Un **diaphragme** réglant la taille de l'ouverture permettant de faire passer la lumière
- ✚ Un **obturateur** réglant le temps de pose pendant lequel la lumière éclaire la surface sensible
- ✚ Une **chambre noire** qui permet d'obtenir une projection de la lumière sur une surface plane
- ✚ Une **surface sensible** pour l'enregistrement de la lumière : elle peut être argentique ou numérique

[CULTURE 3D CLOUD, 2010]

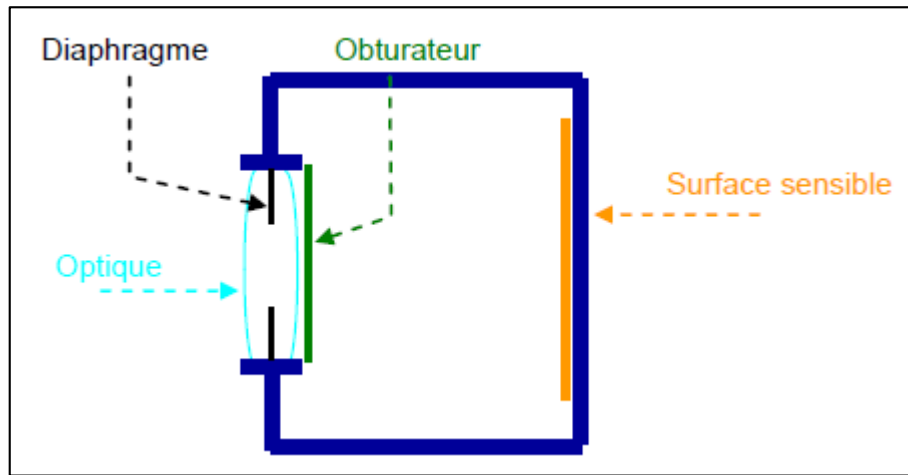


Figure 2 : Schéma simplifié d'un appareil photographique

I.4.2. Aspects radiométriques

Comment la lumière est mesurée ? (en termes de luminosité et couleur)

I.4.2.1. Exposition

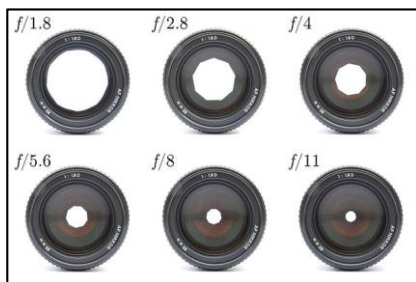
L'exposition est la quantité de lumière qui atteint la surface sensible. C'est une combinaison de la portion de lumière traversant l'objectif (contrôlée par l'ouverture) et de la durée pendant laquelle la lumière entre (contrôlée par l'obturateur). [CULTURE 3D CLOUD, 2010]

I.4.2.1.1. Ouverture

Le **diaphragme** est une structure opaque munie d'une ouverture, qui est proche du centre optique de l'objectif.

L'**ouverture** d'un objectif photographique est le réglage qui permet d'ajuster le diamètre d'ouverture du diaphragme. Elle est caractérisée par le **nombre d'ouverture**, qui est le rapport de la **distance focale** sur le **diamètre de l'ouverture**, plus fréquemment notée « f / N ». [CULTURE 3D CLOUD, 2010]

$$N = \frac{f}{d}$$



Le réglage de l'ouverture influe très sensiblement sur la profondeur de champ et la qualité optique de l'image, la plupart des objectifs étant meilleurs entre 5.6 et 11.

Figure 3 : Différents réglages de l'ouverture

1.4.2.1.2. Temps d'exposition

L'obturateur est placé soit près du centre optique de l'objectif (obturateur central), soit devant le capteur (obturateur à rideau). Le **temps d'exposition** t_e (ou **vitesse d'obturation** ou **temps de pose**) est le temps pendant lequel l'obturateur reste ouvert. Des valeurs standards sont : 1s, 1/2s, 1/4s, 1/8s, 1/15 1/250s, 1/500s ...

Si le temps d'exposition est trop long (durée qui dépend du photographe et de la distance focale), l'image peut être floue (on parle de flou de bougé). Pour des images terrestres, afin de s'affranchir de cet effet, il faut utiliser un pied photo (Figure 26.a) ou placer l'appareil sur une surface stable. [CULTURE 3D CLOUD, 2010]

1.4.2.1.3. Sensibilité ISO

Le système ISO permet de mesurer la sensibilité des surfaces sensibles. Quand la sensibilité est haute, le capteur ou le film nécessite moins de lumière pour obtenir une image correctement exposée.

Sur les appareils photo numériques, la sensibilité ISO est rendue par l'application d'un facteur d'amplification au compte numérique du pixel. Une forte amplification augmente le bruit présent dans l'image. Ainsi, les valeurs ISO élevées conduisent souvent à une perte de la qualité image.

[CULTURE 3D CLOUD, 2010]

1.4.2.1.4. Mesure et modes d'exposition

Les appareils photo sont équipés d'un **posemètre** qui mesure la lumière incidente à travers l'objectif (en prenant en compte la sensibilité de la surface sensible). [CULTURE 3D CLOUD, 2010]

Il existe plusieurs modes de mesure de l'exposition :

✚ **Moyenne à prédominance centrale** : la lumière est évaluée sur toute la surface visée, mais l'appareil va privilégier les mesures effectuées au centre du viseur ; 

✚ **Multizone (ou évaluative)** : la lumière est évaluée sur toute la scène visée. L'appareil calcule alors une exposition, en essayant de "comprendre" la structure de la scène (contre-jour, ombre, ...). 

✚ **Spot** : la mesure n'est effectuée que sur une toute petite surface située au centre du viseur. 

1.4.2.2. Balance des blancs

La couleur d'un objet dépend de ses propriétés mais également de la couleur de la source de lumière. Le but de la **balance des blancs** est de corriger les dominantes de couleur des sources de lumière présentes lors de la prise de vue. Cette correction peut être calculée automatiquement (mode « AWB » Automatic White Balance). [CULTURE 3D CLOUD, 2010]

I.4.3. Aspects Géométriques

L'identification de la géométrie du capteur il est très important pour l'acquisition des données photographiques à l'aide d'une plateforme spatiale ou aérienne (satellite, avion ou drone), autrement dit le déplacement de ces plateformes crée un vecteur vitesse de l'image dans le plan focal, ce dernier perturbe le système d'enregistrements de valeur du pixel. Ce qui présente le phénomène de « filé », parce que l'image bouge continuellement dans le plan focal avec le mouvement de l'avion ou du satellite. [FERRIERES, 2004]

Il y a essentiellement deux géométries de capteurs parmi ceux qui sont employés pour des traitements photogrammétriques : la géométrie conique et la géométrie cylindro-conique.

On trouve la barrette **CCD** ou encore **DTC** (Dispositif à transfert de Charges) utilise à la fois les propriétés d'un registre de lecture à décalage constitué de capacité **MOS** (Métal Oxyde Semi-conducteur) et l'effet photoélectrique dans un semi-conducteur.

La barrette **CCD** permet de réaliser un capteur d'intensité lumineuse à une dimension.

Les capteurs matriciels (n lignes $\times$ m colonnes) équipent la majorité des caméras photogrammétriques et tous les appareils numériques grand public.

Les capteurs linéaires ou à barrettes (1 ligne $\times$ m colonnes) équipent les satellites et quelques caméras aéroportées (ADS de Leica...). [F. GERVAIX, 2010]

I.4.3.1. Lois générale et termes

Un objectif photographique est constitué de plusieurs lentilles et permet d'obtenir des images réelles sur la surface sensible de l'appareil photographique ; L'axe optique de l'objectif est l'axe de symétrie du système. En optique de Gauss (qui est simplificatrice), l'objectif est assimilé à une unique lentille mince convergente, représentée par une double flèche. Le centre optique de la lentille est l'intersection O de la lentille avec l'axe optique. De plus, tout rayon lumineux passant par le centre de la lentille n'est pas dévié.

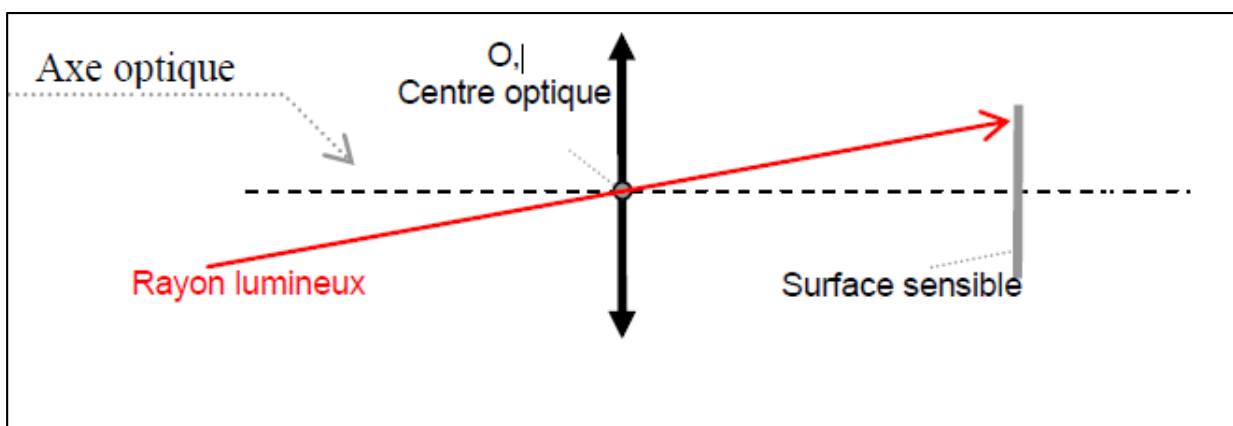


Figure 4 : Une représentation dans l'approximation de Gauss

Pour avoir déterminé la surface ciblée par votre caméra faut prendre en considération l'angle de champ (**FOV**) et la distance focale de l'objectif utilisé. Tel que l'angle de champ dépend de la distance focale et du format de la surface sensible.

Certains appareils photo ont un capteur d'une taille inférieure au film 35mm. Les photographes utilisent alors la notion de distance focale équivalente en 35mm : il s'agit de la distance focale qui permet d'obtenir un angle de champ équivalent à celui que l'on obtiendrait si le capteur était de même format qu'un film 35mm.

Ainsi, pour les appareils compacts équipés de petits capteurs, le constructeur annonce la focale équivalente et non la focale réelle. Il est possible de calculer cette focale réelle en utilisant le rapport entre la diagonale du capteur (Diag-capteur) et celle du film 35mm (Diag-24x36mm $\approx$ 43.3mm). [FERRIERES, 2004].

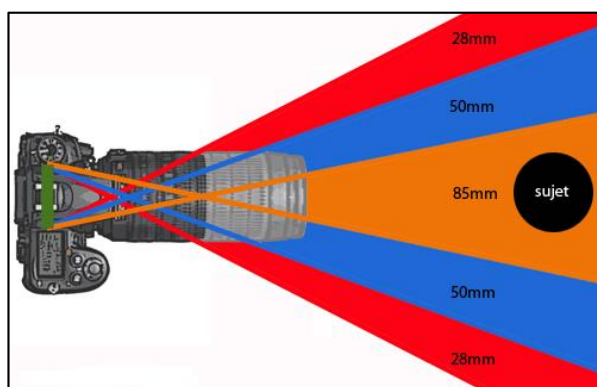


Figure 5 : Principe d'une distance focale

$$F_{\text{réel}} = \frac{\text{Diag-capteur}}{\text{Diag-24}\times\text{36}} \times F_{\text{équivalente}}$$

Avec :

Diag_24x36= 43.3mm

Diag _capteur= 7.7mm (par exemple)

$F_{\text{équivalente}} = 35\text{mm}$

Tableau.1 : les différentes tailles des capteurs

Standard	Diagonale	Dimensions de l'image	Exemples
1/2,5"	7,18 mm	5.76 x 4,29 mm	Panasonic TZ6
1/2,3"	7,81 mm	6.16 x 4,62 mm	Nikon P90, Canon 110 IS, Samsung ES60
1/2"	8 mm	6.4 x 4,8 mm	Fuji F70EXR
1/1,7"	9,5 mm	7.6 x 5,7 mm	Canon G10
1/1,6"	10 mm	8 x 6 mm	Fuji S200EXR
4/3"	21,6 mm	17.3 x 13 mm	reflex 4/3 et hybrides Micro 4/3
APS	24,8 mm à 28,4 mm	20.7 x 13,8 mm (Sigma) à 23,6 x 15,8 mm (Nikon, Sony)	reflex amateurs
36 x 24	43,3 mm	36 x 24 mm	Nikon D700, Sony Alpha 900

I.4.3.2. L'objectif photographique

L'objectif est un assemblage des diverses lentilles centrées, de telle sorte son nature individuelle éliminent les principaux défauts optiques (aberrations). Il est constitué d'une lentille ou, dans la plupart des cas, de plusieurs lentilles, ce dernier permet de transposer un objet en trois dimensions sur une surface image bidimensionnelle.

L'objectif est un dispositif opto-mécanique qui doit restituer le plus fidèlement possible l'espace photographié tant d'un point de vue géométrique (en minimisant les aberrations géométriques) que chromatique (en corrigeant l'aberration chromatique).

Camera SRL :

L'appareil photo SLR (single-lens reflex) a un reflex numérique autofocus à objectifs interchangeables, avec un viseur optique où l'oculaire offre la prévisualisation optique la plus précise de sorte que le photographe peut être sûr que la photo est bien cadrée, même l'éclairage doit être le modifié avant de prendre une photo.

Camera non-SRL :

Les caméras numérique compact ce sont des camera à chambre non métrique, par suite les coefficients de l'orientation interne sont inconnues donc il faut étalonnée cette caméra lors de l'utilisation dans les applications photogrammétriques.

Avec l'évolution de la résolution et de la qualité des images obtenues avec des caméras non métriques, elles sont utilisées en photogrammétrie aérienne et terrestre. Les images issue par des camera non métriques peuvent être utilisées pour modéliser des objets 3D, reconstruire des monuments, générer des modèles altimétriques numériques (MNT), des ortho-photos. [FRYSKOWSKA ET ALL, 2016]

I.4.4. Chambre photographique

Généralement, un système précis de prise de vue de petit format repose sur une caméra métrique (avec repères de fond de chambre) ou bien caméra non métrique (sans repères de fond de chambre).

I.4.4.1. Les chambres métriques

Les chambres métriques, avec orientation interne connue et étalonnée et une distorsion connue de l'objectif. Pour garantir des bons résultats, le rapport entre la base stéréoscopique (la distance entre les positions de la chambre) et la distance de la chambre à l'objet devrait être compris entre 1:5 et 1:15.

Les repères de fond de chambre réalisent le système de coordonnées de l'image qui doit être assuré une haute qualité géométrique.

I.4.4.2. Les chambres non métriques

Les chambres non métriques (sans repères de fond de chambre) peuvent être utilisées en photogrammétrie, bien que leur orientation interne soit complètement ou partiellement inconnue et/ou instable. Par rapport aux chambres métriques, ces dernières présentent les avantages suivants :

- + Souplesse dans le choix de la focale
- + Possibilité d'une chambre motorisée qui permet une succession rapide des prises de vue
- + Maniabilité qui les rend orientables dans toutes les directions
- + Utilisation de films grand public (24x36 mm)

Les inconvénients sont notamment l'absence de repères de fond de chambre (même s'ils peuvent être introduits dans la chambre), l'instabilité de l'orientation interne et les lentilles qui sont généralement optimisées pour une haute résolution au défaut d'une bonne qualité géométrique (d'où des distorsions souvent irrégulières).

- ⇒ Mais avec l'évolution des solutions photogrammétrique (logiciel), ce problème d'absence de repères de fond de chambre a été résolu par des algorithmes très précis de ces logiciels (ex : Agisoft, photo modeler, Pix 4 D...).
- ⇒ On trouve que la société *3D Robotics* www.3dr.com (c'est un fabricant des véhicules aériens sans pilote), utilise une caméra non métrique ayant des performances modestes (objectif compact, 12 mégapixels (4 000 x 3 000) et une taille du capteur de 5,9 x 4,5 mm), pour effectuer des levés dans des régions éloignées son poids peut augmenter considérablement le temps de vol.

[HTTPS://WWW.GIM-INTERNATIONAL.COM/CONTENT/ARTICLE/SELECTING-CAMERAS-FOR-UAV-SURVEYS](https://www.gim-international.com/content/article/selecting-cameras-for-uav-surveys)

On trouve deux catégories dans ce type de chambre :

- + Camera SLR : assure une flexibilité dans le choix de l'objectif puisqu'il est manuel, détachable et il existe sous différentes gammes.
- + Camera non-SLR : ce type d'objectif est physiquement plus petit que celui du camera SLR, fixe, non détachable et motoriser.



Figure 6 : Camera non-SLR



Figure 7 : Camera SLR

1.5. Notions photogrammétrique

1.5.1. Couple stéréoscopique

Quel que soit le matériel utilisé et le but recherché, la présence d'un couple stéréoscopique est le point de départ d'une procédure photogrammétrique sans lequel aucun traitement n'est possible. Deux photos d'un même objet pris de points de vue différents et possédant un minimum de points correspondants suffisent à la création d'un couple stéréoscopique.

D'une manière semblable à nos yeux percevant chacun une image différente et décalée d'un même objet, les photographies doivent être prises de points de vue distincts. Toutefois, la distance entre les deux images ne peut être pas trop importante. [DEPLANCKE, 2014]

1.5.2. Mise en place d'un couple stéréoscopique

1.5.2.1. L'orientation externe

Cette orientation déterminée par l'emplacement et l'orientation de l'appareil photo numérique au moment de la prise de vue. Elle peut être relative ou absolue :

-  Relative : se trouvant dans un espace sans échelle ni orientation. En général, la position de la première photographie est prise comme origine du système de coordonnées, les suivantes étant calculées par rapport à elle.
-  Absolue : se trouvant dans un système de coordonnées connu, à une échelle connue.

1.5.2.2. L'orientation interne

Cette orientation déterminée par les quatre paramètres de calibration de l'appareil photo numérique suivants :

-  La distance focale : elle sépare le foyer du centre de la lentille.
-  Le centre principal de symétrie : ce point se trouve à l'intersection de l'axe optique et du capteur photosensible. La distorsion y est nulle.

Le centre principal d'autocollimation : il correspond au centre de l'image formée à travers l'objectif par un faisceau de rayons parallèles entre eux et perpendiculaires au fond de la chambre. La fabrication du système optique n'étant pas parfaite, il ne se trouve pas réellement au centre de l'image. [DEPLANCKE, 2014]

-  Le polynôme de distorsion : les distorsions sont dues au non-parallélisme entre les rayons. Elles peuvent être classées en deux catégories :
 - Distorsion tangentielle : elle est due au mauvais ajustement des lentilles par rapport à l'axe optique, et rarement prise en compte.
 - Distorsion radiale : elle est due à l'éloignement du diaphragme par rapport au centre optique.

I.5.2.3. Orientation automatique d'un couple stéréoscopique

La première étape consiste à détecter et extraire certaines caractéristiques des photographies. L'objectif est d'identifier les points intéressants dans chaque image. Cette phase est entre autres réalisée grâce à la méthode **SIFT** (Scale-Invariant Feature Transform) développée par **D. Lowe**. Les points caractéristiques extraits grâce cette méthode sont fortement distinctifs et invariables aux différentes transformations et changements de luminosité. [DEPLANCKE, 2014]

Subséquentement intervient l'estimation des paramètres de l'appareil photographique numérique. Etant donné un ensemble de photographies, le but de cette étape est de récupérer simultanément la géométrie en trois dimensions de la scène et les informations de l'appareil photo numérique. Ces dernières incluent les paramètres externes (position et orientation des images au moment de la prise de vue) et internes (paramètres de calibration de l'appareil photo numérique). Tout ceci est à nouveau accompli grâce à la technique **SIFT**.

Au final, les images sont redressées de manière à ce que les vecteurs reliant chaque paire de points de deux images soient parallèles, ce qui supprime les distorsions des photographies et permet de calculer les distances réelles. [DEPLANCKE, 2014]

L'estimation des paramètres externes pour cette paire initiale se déroule comme suit : tout d'abord, l'algorithme **SFM** (Structure from motion) oriente toutes les photographies de manière relative et estime les paramètres internes de l'appareil photo numérique, ce qui permet par la suite la matrice essentielle d'être estimée grâce à l'algorithme des cinq points. Ensuite, la matrice de projection peut être extraite en décomposant la matrice essentielle. Les points caractéristiques visibles sur les deux images sont alors triangulés, de manière à donner un ensemble de points en trois dimensions. [DEPLANCKE, 2014]

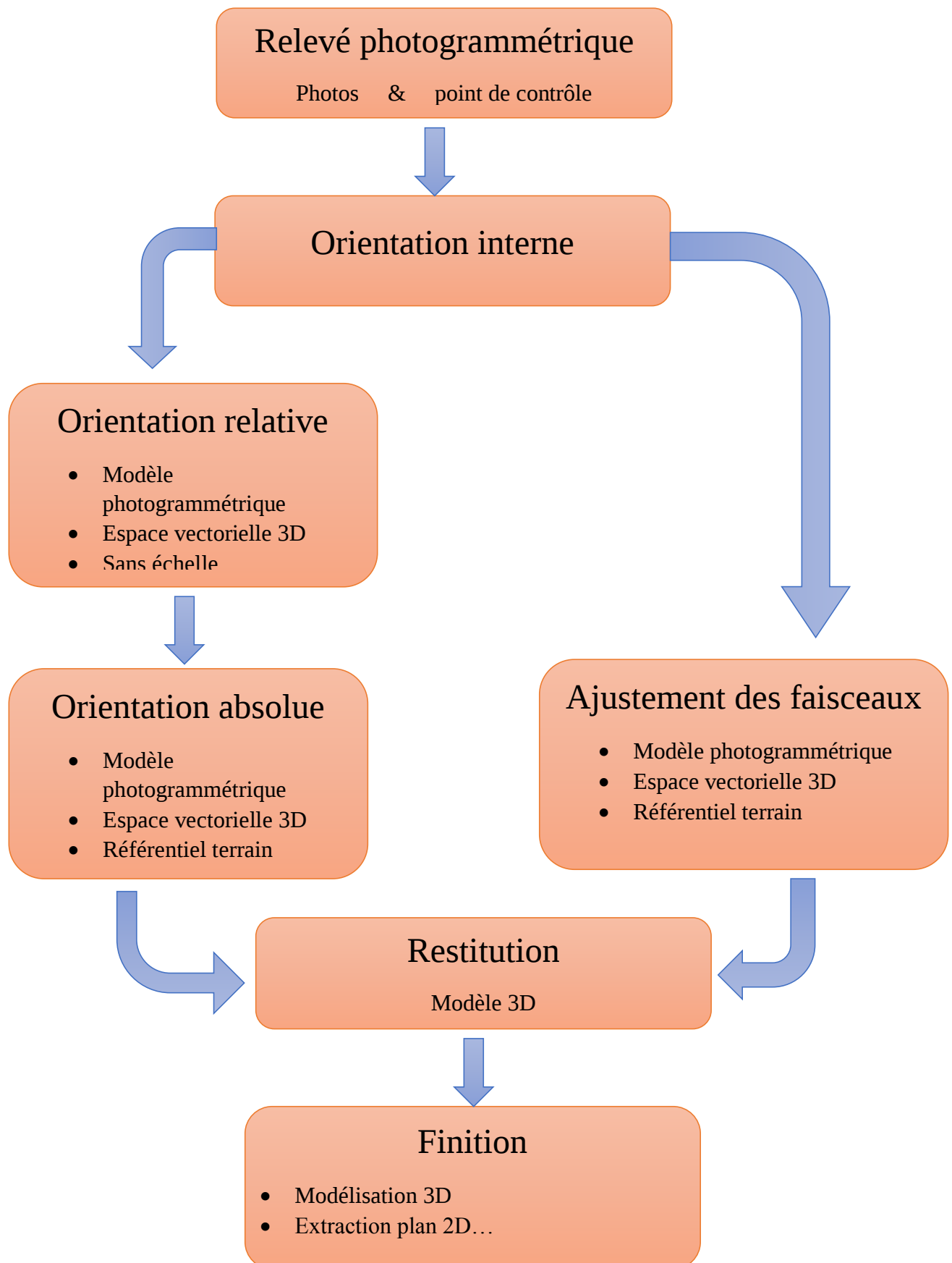
Les trois tâches principales de la SFM sont :

-  L'analyse des mouvements de caméra et de la scène
-  Le recouvrement des déplacements de caméra
-  La construction de la scène en 3D

I.5.3. Restitution

Une fois l'orientation interne et externe de chaque image déterminée, il est possible de calculer la position de tous les points-objet représentés sur au moins deux images. Étant donné qu'il s'agit de résoudre un système de quatre équations avec 3 inconnues (X, Y, Z), sa résolution permet d'évaluer également l'incertitude sur la détermination du point-objet. Le résultat de la restitution conduit à la définition des points, qui sont couplées avec les points définis lors de l'étape d'orientation interne et externe, fournissent la base du modèle 3D de la scène. Ces points peuvent être ensuite utilisés pour créer des lignes ou polygones et être retravaillés dans des logiciels de modélisation 3D. [LORENZO, 2009]

Organigramme : Les étapes expérimentales de la photogrammétrie



I.6. La photogrammétrie terrestre et aérienne

La photogrammétrie est une technique de mesure qui, à partir d'informations en 2D, permet de retrouver les dimensions et la position des objets observés. Comme son nom l'indique, la photogrammétrie se base sur l'analyse des photographies. On trouve deux types qu'ils sont couramment utilisés : la photogrammétrie à grande distance, pour des distances de prises de vue supérieures à 300 m, généralement comparable à la **photogrammétrie aérienne**, et la **photogrammétrie rapprochée**, liée à la photogrammétrie terrestre.

Au niveau de manière de prise de vue ces derniers sont différents mais toujours le principe c'est le même, surtout avec l'évolution des logiciels la photogrammétrie terrestre se font au niveau de la reproduction des données obtenues après le traitement photogrammétrique. La visualisation de la position des prises de vue intégrées dans un modèle photogrammétrique n'est plus uniquement représentée par des coordonnées ou des plans, mais aussi dans un modèle 3D qui reproduit la position et l'orientation de la prise de vue. [LORENZO, 2009]

Par comparaison à la photogrammétrie aérienne, la photogrammétrie terrestre n'est pas limitée aux prises de vues verticales avec des appareils photos spéciaux. La méthodologie de la photogrammétrie terrestre a considérablement changée ; diverses méthodes d'acquisition sont en usage et surtout avec les nouvelles technologies et techniques d'acquisition de données et les méthodes de traitement informatisé.

Actuellement, les applications de la photogrammétrie terrestre sont très variées comme : levé topographique, suivi d'ouvrage d'art, explorations de zones dangereuses ou inaccessibles, industrie, archéologie, architecture, cartographie des rues, calcul volume...

La photogrammétrie terrestre et la photogrammétrie aérienne n'ont ni les mêmes applications, ni les mêmes exigences. Parmi les applications de la photogrammétrie aérienne on a : levé topographique à moyenne échelle, levé cadastrale, urbanisme, agriculture, environnement...

Tableau.2 : comparaison entre la photogrammétrie rapprochée et l'aérienne

	photogrammétrie rapprochée	photogrammétrie aérienne
Distance de l'objet observé	De 1 à 100m	Jusqu'au 800m
Axe de prise de vue	Horizontale ou oblique	Verticale (nadirale)
Surface balayé pour un couple stéréoscopique	Réduite	Etendue
Précision	Relative à l'orientation relative	Relative à l'orientation relative (moins que le mode rapprochée)
Temps d'acquisition	Moyenne	Rapide
Stéréo-préparation	Point d'appuis Recouvrement des photos Modèle de mission de prise de vues	Point d'appuis Plan de vol Axe de prise de vue Recouvrement des photos
Cout	Faible	Elevé
Temps de post-traitement (sur même PC et même logiciel)	Rapide	Moyenne

I.7. Logiciels de photo-modélisation

I.7.1. Solution web

Ce sont des application web permettant l'utilisateur débutant d'essayer l'application de la photogrammétrie sur une quantité limitée d'images qui peuvent être chargées sur le serveur.

Photosynth :

C'est une application en ligne lancée par Microsoft. L'utilisateur doit télécharger ses images sur un serveur. Un algorithme permet ensuite d'orienter les différentes photos. Un nuage de points 3D est ensuite créé. Originellement, il n'était pas prévu que l'utilisateur puisse récupérer ce nuage. Celui-ci peut cependant être téléchargé à l'aide d'une boîte à outil. Le nuage de points est ensuite traité à l'aide d'un autre logiciel.

Le principal défaut de ce logiciel est de fonctionner en «boîte noire». Seul le résultat final est communiqué à l'utilisateur, qui n'a pas connaissance des étapes intermédiaires et la quantité d'image limitée. [THIBAUT DUDKA, 2015]

Recap 360 Photo :

C'est une solution payante également proposée par Autodesk. Ce dernier donne la possibilité de sélectionner des points de contrôle sur les photos, ou des distances entre deux points. La quantité limite de photos téléchargeables est de 5Go.

Cette solution ne paraît néanmoins toujours pas adaptée aux professionnels. En effet, il n'est pas possible de produire d'ortho-photos, ni de modèle numérique de terrain. De plus, les paramètres du traitement ainsi que les erreurs finales ne sont pas précisés. [THIBAUT DUDKA, 2015]

123DCatch

De même il est développé par Autodesk, sur le même principe, l'utilisateur est invité à télécharger ses images et récupère un modèle 3D de l'objet choisi. Il existe même une application pour téléphone. Ces défauts : «boîte noire», manque de fiabilité... Bien qu'adaptée à des utilisateurs débutants n'ayant pas de connaissances poussées en topographie, elle n'est pas adaptée à des professionnels. Seule 40 photos peuvent être téléchargées, ce qui est très peu pour un projet photogramétrique. [THIBAUT DUDKA, 2015]

I.7.2. Les solutions payantes

Ce sont des solutions commerciales de nombreuses entreprises ont développé leurs propres outils pour répondre à la demande croissante de ce marché en plein essors. Ci-dessous sont présentées celles sur lesquelles nous nous sommes penchés :

Correlator3D :

Simactive : une société canadienne, a conçu le logiciel Correlator3D. Initialement positionné sur le secteur de l'imagerie spatiale et aérienne, ce groupe propose depuis cinq ans une solution conçue pour les drones. Il est nécessaire de connaître les positions approximatives de la caméra au moment des prises de vue avant le traitement des données.

Le fait que le nuage de point créé par ce logiciel soit en 2.5D a constitué pour nous une faiblesse rédhibitoire, notamment pour la modélisation des bâtiments. Il n'est pas non plus adapté à la photogrammétrie terrestre. [THIBAUT DUDKA, 2015]

*2.5D : tant que une position (x,y) prend un et un seul valeur de Z.

Pix4D

Fruit d'une start-up née au sein de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), PIX4D est l'une des principales solutions professionnelles sur le marché de la photogrammétrie. Ce logiciel permet de réaliser les principaux produits photogrammétriques, du nuage de points au modèle numérique de terrain, en passant par les orthophotographies. La société s'est imposée depuis sa fondation en 2011 comme l'un des leaders dans le domaine. Son interface très intuitive permet une prise en main rapide. [THIBAUT DUDKA, 2015]

Photomodeler

L'éditeur canadien Eos System propose quant à lui Photomodeler. Ce logiciel a des fonctionnalités assez proches de celles de Pix4D, malgré une interface légèrement moins intuitive. Les algorithmes de sélection et de mise en correspondance des points homologues sont également différents. Lancé en 1993, il fut pendant de nombreuses années le principal logiciel de photogrammétrie sur le marché. [THIBAUT DUDKA, 2015]

PhotoScan

Photoscan a quant à lui été développé à Saint-Petersbourg en Russie. Il est développé par Agisoft depuis 2006. Cette solution est également très utilisée par les professionnels. Elle permet de mettre en correspondance des photos, de créer des nuages de points densifiés, des maillages ou encore des orthophotos. [THIBAUT DUDKA, 2015]

1.7.3. Les solutions open source

Certains organismes publics, universitaires ou collectivités, mettent à la disposition du public des logiciels gratuits. Le plus souvent le code est en open source, ce qui permet de comprendre les méthodes utilisés et de les adapter aux besoins. [THIBAUT DUDKA, 2015]

Visual SFM

(Visual Structure from Motion System) a été créé par Changchang Wu, de l'université de Washington à Seattle.

Ce logiciel permet de créer un nuage de points à partir de photos. Il est ensuite possible d'utiliser des logiciels de traitement de nuage de points, tels que Meshlab, pour réaliser un maillage.

Cependant, la licence de ce logiciel est très restrictive et interdit toute utilisation lucrative, ce qui est problématique dans le cas qui nous intéresse. De plus, il n'est pas possible de créer d'orthophotographies avec Visual SFM. [THIBAUT DUDKA, 2015]

PAM (Pastis-Apéro-MicMac)

Le laboratoire MATIS de l'IGN a développé la suite PAM (Pastis-Apéro-MicMac). PASTIS, le premier module, a pour but d'extraire les points d'intérêt et de liaison des différentes images. APÉRO permet quant à lui de calculer la position et l'orientation des images ainsi que la détermination du fichier de calibration de la caméra. Pour finir, le dernier module MicMac peut générer des nuages de points.

Le principal défaut de cette solution est également sa principale force : sa complexité. Si cela peut rebuter à première vue les utilisateurs non avertis, les nombreuses possibilités de paramétrage offertes par cette solution permettent de s'adapter à chaque cas. [THIBAUT DUDKA, 2015]

1.8. La photogrammétrie et leur application topographique

1.8.1. Cadastre

L'usage des procédés photogrammétriques dans les travaux du cadastre expérimenté depuis l'époque de la photogrammétrie analytique... L'évolution de la photogrammétrie et l'expérience acquise permettant désormais de réaliser un levé cadastral sur tous pour les zones étendues et densifiées on trouve que cette méthode plus économique et plus rapide, de même elle est précise. Les missions technique et documentaire du cadastre utilisent la photogrammétrie pour l'amélioration et le renouvellement des plans cadastraux à des échelles différentes selon la nature et la densité de la zone (1/500 ; 1/1000 ; 1/2000 ; 1/2500), pour avoir des plans restitués ou des ortho-photos plan. Pour ces applications on trouve que la photogrammétrie aérienne est la plus efficace. [ISABELLE ADRIEN, 2010]

1.8.2. Auscultation

L'auscultation est un ensemble d'examen et de mesures spécifiques faisant le plus souvent appel à des techniques élaborées, et qui vise à mieux connaître l'état réel d'un ouvrage pour aboutir à un diagnostic de sa pathologie. Certaines méthodes d'auscultation peuvent être utilisées avec une fréquence plus ou moins régulière pour effectuer un suivi du comportement d'une structure au cours du temps ; cette activité rentre dans le cadre de la surveillance renforcée ou de la haute surveillance. Parmi les méthodes d'auscultation des ouvrages on a :

- ✚ **Topographie** : relevée topographique classique d'un maillage de point prédéterminer sur l'ouvrage pour consulter leurs désordres en fonction de temps.
- ✚ **Radar** : détection des cibles par rayonnement d'énergie électromagnétique et analyse de l'énergie rétro-diffusée, au but de trouver les vides dans le corps de l'ouvrage.
- ✚ **Inclinomètre** : étudier les déformations angulaire sous-sol, par exemple dans un forage.
- ✚ **Laser** : Technique basée sur la mesure du temps de vol d'une impulsion émise par un télémètre laser et détectée en retour, au but d'évaluer la forme et la position des différentes composantes de l'ouvrage en fonction de charge et de temps.
- ✚ **Photogrammétrie** : permet d'exécuter des mesures spatiales à partir de photos ou d'autres images numériques, au but d'évaluer la forme et la position des différentes composantes de l'ouvrage en fonction de charge et de temps.

L'utilisation de ces méthodes dépend le type de désordre de l'ouvrage à déterminer (structure, forme, position, inclinaison, rigidité...). Les procédures photogrammétriques aident à prendre la décision relative à l'ouvrage par un diagnostic tridimensionnel sur la forme et les différents déplacements de l'ouvrage. Cette dernière peut être terrestre ou aérienne, selon les besoins technique et méthodique de l'étude.

Ces désordres peuvent être concernés les barrages (digue d'un barrage), les réservoirs, Les anciens immeubles... selon la solution de l'ingénieur la photogrammétrie est accessible aux plusieurs types des projets d'auscultation. [1] [2]

1.8.3. Calcule des volumes

Les modèles tridimensionnels issus de la restitution photogrammétrique représentent plusieurs informations géométriques et spatiales. Dans ce contexte on trouve les modèles volumétriques, cette représentation est conforme à la réalité si l'on s'intéresse aux propriétés de masse, aux propriétés dynamiques ou aux propriétés de la matière. Dans ce cas, des informations supplémentaires qui n'appartiennent pas à la géométrie pure de l'objet doivent être évaluées.

La caractéristique des modèles en volume est la représentation informatique volumétrique d'objets physiques à trois dimensions du monde réel. Parmi les modèles volumétriques les plus utilisés, il y a celui de la représentation par les bords (**Brep** ou Boundary Representation) et celui de la géométrie constructive du solide (**CSG** ou Constructive Solid Geometry).

Que ce soit le type de photogrammétrie appliqué, les résultats des modèles volumétriques obtenues à l'aide des solutions de la photo-modélisation peuvent être utiliser pour :

- Volume de la production des carrières
- Calcul des cubatures dans un projet routier (volume en déblais ou en remblais)

[DEPLANCKE, 2014].

1.8.4. Levée topographique

Depuis la naissance de la photogrammétrie elle est utilisée dans les travaux à lever topographique mais avec l'essor des techniques et des méthodes d'acquisition et traitements l'utilisation de la photogrammétrie avec ses différents types dans les levés topographiques augmente.

Toujours la photogrammétrie aérienne présente comme la meilleure méthode pour ces travaux topographiques :

- Levé topographique d'une carrière
- Levé topographique d'une zone étendu
- Orthophotographie des sites.
- Relevé du Modèle numérique de terrain (MNT)
- Relevé du Modèle numérique de surface (MNS)

Chapitre II :

Travaux de préparation

Introduction

Afin d'utiliser les images comme des instruments de mesure il est nécessaire de connaître précisément la relation entre les coordonnées terrain et les coordonnées image pour avoir la conservation géométrique, cela est assuré par la condition de la colinéarité. Donc pour exploiter les informations bidimensionnelles dans l'image et les transformer en données tridimensionnelles la connaissance des paramètres de la caméra est nécessaire. [RAPHAËLE HENO, 2014]

II.1. Etalonnage de l'appareil photo

II.1.1. Appréciations aux distorsions

Les distorsions d'un appareil photographique sont des aberrations caractérisées par la variation des grandissements angulaires en fonction de leur distance à l'axe optique et indépendante de la pupille. Elles traduisent les imperfections du système optique, et ne changeant que l'échelle de l'image, et non sa forme, centré sur le Point Principal de Symétrie, PPS (intersection de l'axe optique avec le plan image).

Par ailleurs, le Point Principal d'Autocollimation (PPA) est la projection orthogonale du centre de la perspective sur le plan. [THIBAUT DUDKA, 2015]

Lors de la modélisation des distorsions d'un système optique, il est possible d'en distinguer 3 principales : radial, tangentielles et affines. Ces distorsions se cumulent de sorte que :

$$\Delta x = \Delta x'_{\text{radiales}} + \Delta x'_{\text{tangentielles}} + \Delta x'_{\text{affines}}$$

$$\Delta y = \Delta y'_{\text{radiales}} + \Delta y'_{\text{tangentielles}} + \Delta y'_{\text{affines}}$$

II.1.1.1. Distorsion radiales

Les distorsions radiales sont généralement les plus importantes. Elles sont fonction de l'éloignement par rapport au point principal. Elles sont généralement modélisées sous la forme d'un polynôme. Plusieurs modèles existent. Les deux principaux sont les modèles balanced et unbalanced. [THIBAUT DUDKA, 2015]

II.1.1.2. Distorsions tangentielles

Les distorsions tangentielles traduisent un défaut de centrage de la lentille, elle est exprimée par un décentrage de l'axe optique et par la nature de prisme. [THIBAUT DUDKA, 2015]

II.1.1.3. Distorsions affines

Les distorsions affines traduisent quant à elles un défaut d'orthogonalité des axes du capteur. Elles sont généralement nulles.

Il est également possible de modéliser ces effets par deux coefficients C1 et C2, liés entre eux. [THIBAUT DUDKA, 2015]

II.1.2. Processus d'étalonnage

Ce passage s'articule mathématiquement sur ces quatre notions :

- ✚ m : Point image dont les coordonnées dans le système image sont (x,y,z).
- ✚ F : Point du centre de projection dont les coordonnées exprimé dans le système image (o,x,y,z).
- ✚ S : Point du sommet de prise de vues dont les coordonnées dans le système terrain (O,X,Y,Z).
- ✚ Matrice de rotation du repère terrain (O,X,Y,Z) vers le repère image (o,x,y,z).

Une caméra doit être étalonnée pour chaque réglage de zoom et de mise au point, de façon à ce que ses paramètres internes (x_{ppa} , y_{ppa} , p , x_{pps} , y_{pps} , et a , b , c , les 3 coefficients du polynôme de distorsion) soient connus. Ceux-ci sont calculés avec précision lors d'une procédure d'étalonnage qui représente une étape importante pour des nombreux algorithmes d'applications photogrammétriques.

L'étalonnage d'une caméra consiste essentiellement à déterminer le modèle mathématique permettant de passer des coordonnées espace (3D) en coordonnées image (2D). [RAPHAËLE HENO, 2014]

ppa : Point Principal d'Autocollimation ; pps : Point Principal de Symétrie

La distorsion (dr) : $dr = ar^3 + br^5 + cr^7$ avec $r^2 = (x - x_{pps})^2 + (y - y_{pps})^2$

Cette équation de distorsion sous la forme d'un polynôme impaire limité au degré 7.

Il y a différents types d'étalonnage sur les logiciels de photo-modélisation, comme :

- ✚ Méthode par grille
- ✚ Méthode au polygone
- ✚ Méthode d'échiquier

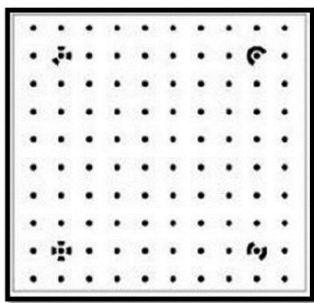


Figure 8 : calibration par grille

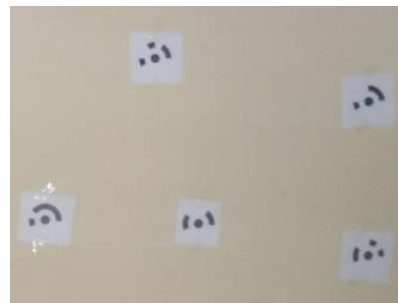


Figure 9 : calibration par polygonal

La plus part des logiciels de photomodélisation (Photomodeler, Micmac) intègre la méthode d'auto-calibrage à ces fonctionnalités, c'est une méthode automatique basé sur le calcul de la géométrie épipolaire. Ce processus se fait en deux étapes. La première est la détermination de la matrice fondamentale représentant la géométrie épipolaire entre deux images successives. La deuxième étape est la détermination des paramètres intrinsèques de la caméra par la relation explicite entre matrice fondamentale et ses paramètres. [RAPHAËLE HENO, 2014]

L'étalonnage d'une caméra se déroule comme suite :

- ✚ Prise de vues du polygone : Prise de vues d'une scène spécifique équipée d'un grand nombre de cibles connues dans le système de coordonnées terrain
- ✚ Mesure des cibles dans toutes les images.
- ✚ Résolution des inconnues (position et orientation des caméras au moment de la prise de vues, distance principale, PPA, PPS, a, b, c) avec un logiciel spécifique.
- ✚ Validation par examen des résidus d'orientation (en moyenne inférieurs au $\frac{1}{2}$ pixel)

[HELP, AGISOFT LENS]

Dans ce contexte Photoscan produise un logiciel spécifique pour l'étalonnage des appareils qui s'appelle **Agisoft Lens**.

Agisoft Lens (64-bit) est un logiciel automatique de calibrage d'objectif, qui utilise l'écran d'affichage à cristaux liquides comme cible de calibrage. Il soutient l'évaluation de la pleine matrice de calibrage d'appareil-photo, y compris des coefficients non linéaires de déformation.

Des paramètres de calibrage estimés peuvent être sauves dont le format est lisible pour l'usage suivant dans le logiciel.

Agisoft Lens prend en charge la détermination de plusieurs paramètres interne de caméra :

- ✚ **fx, fy** : Distance focale en x et y (dimensions mesurées en pixels).
- ✚ **cx, cy** : Coordonnées du point principal, sont les coordonnées d'intersection de l'axe optique de lentille avec le plan du capteur.
- ✚ **b1, b2 (Skew)** : Coefficient de transformation par inclinaison.
- ✚ **k1, k2, k3, k4** : Coefficients de distorsion radiale.
- ✚ **p1, p2** : Coefficients de distorsion tangentielle.

Le modèle ciblé pour l'étalonnage est sous la forme d'un **échiquier**, qui sera photographié au minimum 3 fois sur des angles légèrement différents.

Les conditions exigées pour photographier correctement le motif d'étalonnage :

- ✚ La distance focale doit être constante.
- ✚ Évitez les reflets sur les photos. (Eloignez les sources lumineuses si nécessaire).
- ✚ Toute la zone de photo doit être couverte par le motif d'étalonnage. (Rapprochez l'appareil photo de l'écran LCD si nécessaire).

Le résultat d'étalonnage de la camera Samsung ES60 est comme suite :

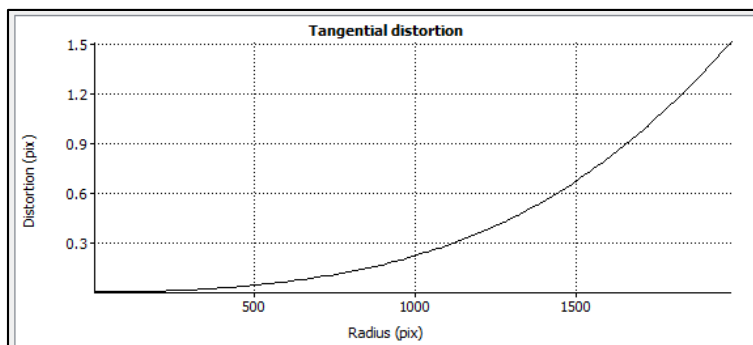


Figure 10 : résultat distorsion tangentielle de camera

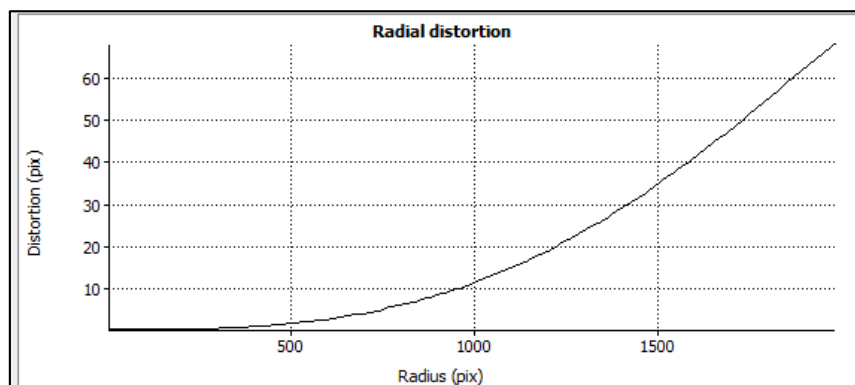
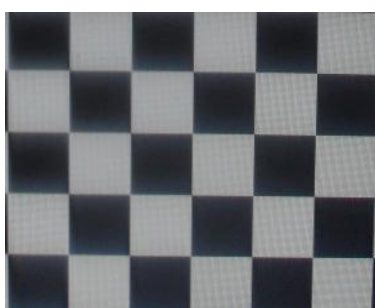


Figure 11 : résultat distorsion radial de camera

EXIF focal length: 6.3		
Parameter	Value	Std Error
Image width	4000	
Image height	3000	
Focal length	4205.26	5.69613
Principal point (x)	-87.6087	1.93823
Principal point (y)	0.857821	1.90137
Affinity B1	-1.99923	0.248215
Skew B2	-1.63256	0.24592
Radial K1	-0.203778	0.00736405
Radial K2	0.091644	0.0788537
Radial K3	0.79364	0.333232
Radial K4	-0.951388	0.481869
Tangential P1	0.000346477	0.000172046
Tangential P2	0.000503143	0.000244247
Tangential P3	9.26167	8.27744
Tangential P4	-7.97231	13.2532

Figure 12 : résultat de calibrage



Cette résultat peut être sauvegardé sous plusieurs formats (.XML ; .Cal ; .txt ; .ini), qu'il sera généré sur Agisofot pour l'introduction des différents paramètres de caméra et leurs distorsions dans la réflexion du logiciel lors de traitement photogrammétrique. Dans le cas de changement de l'objectif ou la distance focal il faut étalonner le camera de nouveau.

Figure 13 : échiquier d'étalonnage

1^{er} Partie : Les théories

II.1. Qualités de la prise de vues

Afin d'assurer une qualité de couverture sur la zone d'étude, certains paramètres préparatoires (paramètres géométrique : distance de prise de vues, taille de l'image, et le recouvrement et d'autres radiométrique : mode d'exposition, temps d'exposition et nombre d'ouverture....) sont inévitablement configurés.

II.1.1. Qualité radiométrique

On peut régler l'information radiométrique de l'image lors le contrôle a posteriori des paramètres qui seront utilisés au niveau de la prise de vues. Ces paramètres sont enregistrés dans les fichiers image dans une structure dite **EXIF** (*Exchangeable Image File Format*) qui peut être lue par l'explorateur de fichiers, soit de façon plus complète par des logiciels spécialisés (logiciels de photo-modélisation).

L'une de partie des paramètres de réglage de l'appareil photo à contrôler pour une prise de vue photogrammétrique sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau.3 : réglage de l'information radiométrique sur une caméra numérique

<i>Paramètre</i>	<i>Intérêt</i>	<i>Valeur</i>
Mode d'exposition	Mesurer la lumière sur la zone d'intérêt photogrammétrique.	M
Nombre d'ouverture	Plus l'ouverture est grande (<i>N</i> plus petit), plus l'image est susceptible d'être floue (à moduler selon la qualité de l'objectif utilisé).	$8 \leq N \leq 16$
Temps d'exposition	Si le temps d'exposition est long, sans pied photo, il y a un risqué de flou de bougé. Il est conseillé de choisir un temps de pose inférieur à l'inverse de la focale équivalente (1/100 ^{ème} de seconde avec une focale de 100 mm).	$t_e < 1/60s$ (sans pied photo)
Sensibilité ISO	De grandes valeurs de sensibilité ISO produisent du bruit dans les images.	$ISO \leq 400$
Balance des blancs	En règle générale, la balance des blancs automatique permet d'obtenir des images correctement équilibrées colorimétriquement. Si nécessaire, il est possible d'utiliser les images RAW afin de corriger des éventuelles erreurs de ce calcul automatique.	Automatique
Format de l'image	L'image RAW permet des traitements radiométriques fins. L'image JPEG offre une visualisation immédiate de l'image.	RAW + JPEG
Qualité de l'image	Pour garder la pleine résolution du capteur.	L

II.1.2. Qualité géométrique

II.1.2.1. L'ouverture angulaire de camera

C'est l'angle de prise de vues de la caméra, cette dernière est inversement proportionnelle aux distances focales. Plus que l'ouverture angulaire est grande plus la surface ciblée élargir, et par suite le nombre des photos diminué. La diminution du nombre des photographies réduire le temps de traitement, mais il faut prendre en considération le recouvrement des photographies.

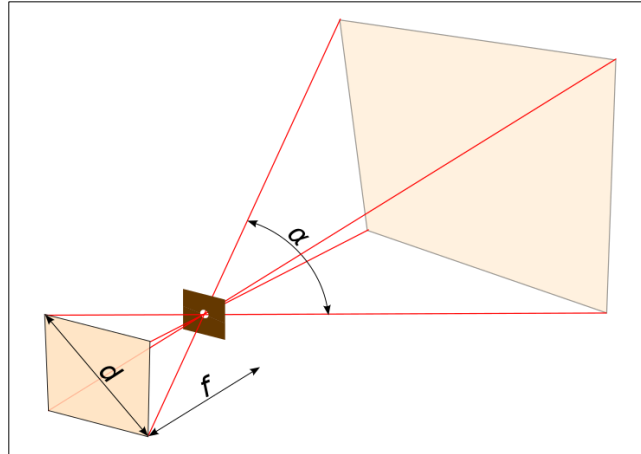


Figure 14 : Ouverture angulaire (FOV)

L'angle de champ (α) de l'appareil photo peut être déterminée à l'aide de la fonction mathématique arc tangente selon la formule suivante : (en degré) [RAPHAËLE HENO, 2014]

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d}{2 \cdot f}\right)$$

Formule.1

- d : est la diagonale du capteur, c'est-à-dire du capteur de l'appareil.
- f : est la focale de l'objectif.

Les valeurs de ces paramètres indiquent au niveau de la fiche technique de chaque camera, par exemple on prend : $d = 7.7\text{mm}$ et $f = 6.3\text{mm}$ (Samsung ES60).

Et par la suite l'ouverture angulaire correspond à 62.85°

II.1.2.2. Résolution spatiale de l'image

Dans le cas d'une image numérique, le terme «échelle» n'est pas approprié dû au découpage de l'image en pixels. [RAPHAËLE HENO, 2014]

Donc le terme **résolution spatiale** est plus préféré avec les images numérique et on le note GSD (Ground Sample Distance) tel que :

$$GSD = \frac{Px \times D}{f}$$

; Où Px est la taille d'un pixel sur le capteur.

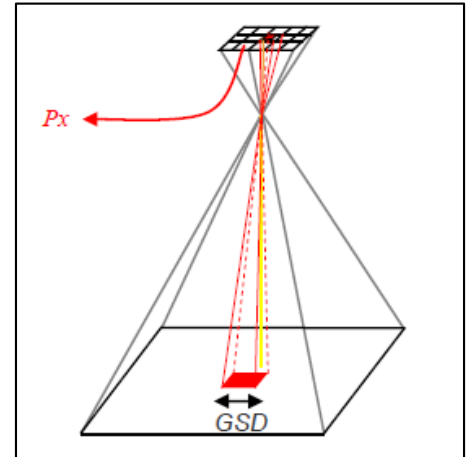


Figure 15 : Image explicative de la résolution spatiale

La détermination de la résolution spatiale avec un capteur plein format (4000 x 3000 pixels) équipé une distance focale de 6.3mm, pour un éloignement de 10m se fait comme suite :

[RAPHAËLE HENO, 2014]

Avec, la taille de l'image au niveau de capteur correspond **6.16x4.62 mm**

$$\frac{F}{D} = \frac{l}{L} \rightarrow \frac{0.0063}{10} = \frac{0.00616}{L} \rightarrow L = 9.7m$$

$$GSD = \frac{L}{l} = \frac{9.7}{4000} = 2.4mm : \text{C'est la résolution spatiale}$$

Avec :

- F : distance focale
- D : distance d'éloignement
- L : longueur réel
- l : longueur sur l'image

II.1.2.3. Taille de l'image

La planification de la prise de vues se base principalement sur le nombre des photos qui sera réalisé sur le terrain pour avoir balayé la cible à 100% avec le minimum nombre des photographies pour accélérer la phase de traitement des données. Cette étape très importante au niveau de calculer des paramètres de recouvrement entre les photographies.

Selon le même principe : $\frac{F}{D} = \frac{l_{on}}{L_{on}} = \frac{l_{ar}}{L_{ar}}$ **Formule.2**

Il faut déterminer la Largeur réel (**L_{ar}**) et la longueur réelle (**L_{on}**) ; tant que la distance focale est de 6.3mm et la taille de capteur de 6.16x4.62 mm, Ont essayé à une distance de 10m.

$$\frac{F}{D} = \frac{l_{on}}{L_{on}} \rightarrow L_{on} = \frac{l_{on} \times D}{F} \rightarrow L_{ar} = \frac{l_{ar} \times D}{F}$$

$$L_{ar} = 7.3m \text{ et } L_{on} = 9.7m$$

Donc à une distance de 10m et avec une ouverture angulaire (FOV) égale à 68.85° la photographie couvre 70.81m².

Tableau.4 : Paramètres géométrique de l'image

Eloignement de la scène (m)	Taille de pixel sur la scène (mm)	Longueur de la photo sur terrain (Lon en m)	Largeur de la photo sur terrain (Lar en m)	La scène photographiée (m ²)
15	3.6	14.6	11	160,60
20	4.9	19.5	14.6	284,70
25	6.1	24.4	18.3	446,52
30	7.3	29.3	22	644,60
35	8.5	34.22	25.6	876,03

II.1.3. Recouvrement des photographies

Pour que la prise de vue soit compatible avec des applications photogrammétriques, il faut s'assurer un recouvrement entre les photos successives. Au sein de chaque bande, les images doivent être prises régulièrement avec plus de 50% de recouvrement de façon que toutes les parties de la scène soient vues depuis deux images au minimum.

Le recouvrement longitudinal doit être plus de 60% et le recouvrement latéral de 20%. Les images sont acquises avec des axes de visée les plus parallèles possibles, si possible perpendiculaire à la scène.

On appelle **base stéréoscopique** la distance entre les positions successives de deux caméras dans la bande, cette base est le complément de la longueur de recouvrement par rapport à la zone totale couverte par une photo (figure 16).

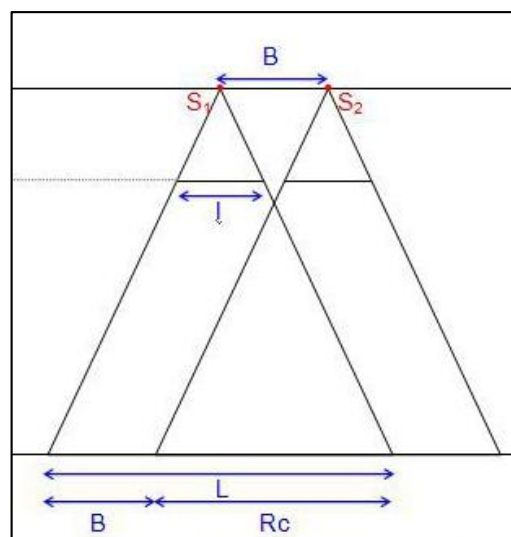


Figure 16 : Différents paramètres de recouvrement

En pratique le recouvrement il est fréquemment spécifié de plus de 60% avec tolérance, pour éviter les trous de stéréoscopie enregistrés dans le cas où on exige une valeur stricte de 50%, d'autre part pour donner les moyens de géo-référencement de toutes les images avec précision. On trouve que quelques logiciels de photo-modélisation demandent un recouvrement longitudinal de 70% à plus.

Pour des applications type « génération de Modèle Numérique de Surface ou Bâtiment en 3D » les recouvrements peuvent être augmentés et atteindre 80% - 30 % en longitudinal et en latéral successivement. La multiplication des points de vue renforce les intersections et permet de fiabiliser les restitutions automatiques.

Il peut également être intéressant de réaliser des prises de vues à fort recouvrement pour la réalisation d'Orthophotographie afin de limiter le recours aux bords des images dans la mosaïque d'images et limiter ainsi les parties cachées

[ANTOINE PINTÉ, 2015]

Noté bien : il faut assurer de n'est pas rater la stéréo (recouvrement) sur le bord de la scène.

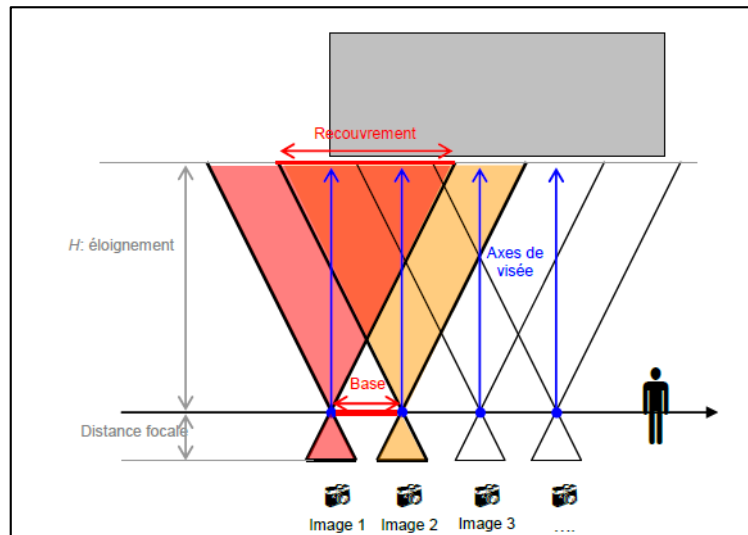


Figure 17 : Principe de recouvrement longitudinal

$$r_c\% = \frac{R_c}{L} \times 100 = \left(1 - \frac{B}{L}\right) \times 100 \quad \text{Puisque : } R_c = L - B$$

Formule.3

- $r_c\%$: recouvrement longitudinale en %
- L : longueur de la zone couverte par une seule photo
- B : base stéréoscopique
- R_c : recouvrement longitudinale sur terrain

[ANTOINE PINTE, 2015]

$$B = L \times (1 - r_c\%)$$

Formule.4

Pour $r_c = 70\%$ et $L = 14.6\text{m}$

Pour $r_c = 70\%$ et $L = 19.5\text{m}$

→ **B = 5.85m**

→ **B = 4.38m**

Bien que le recouvrement latéral se présente comme un recouvrement entre les bandes il est autour de 20%, toujours pour faciliter le géo-référencement de tous les photos.

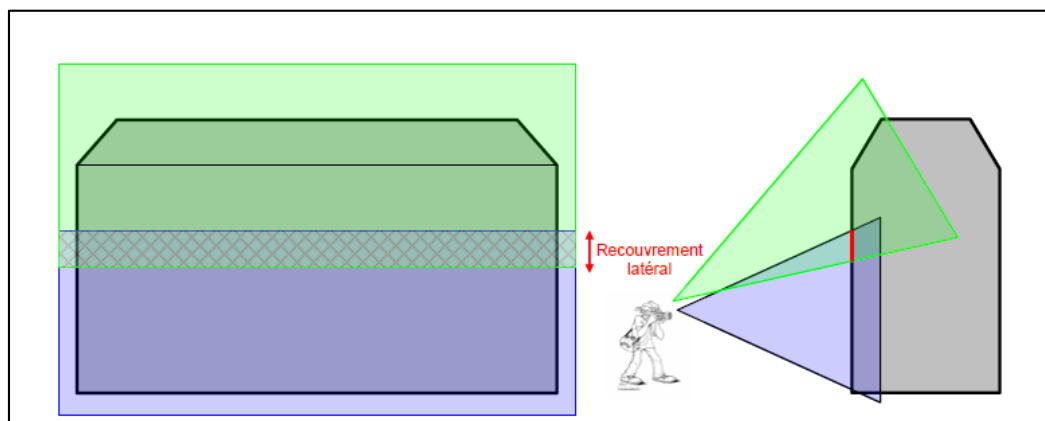


Figure 18 : Principe de recouvrement latéral

Pour mesurer la distance inter-bande dans le recouvrement inter-bande il faut appliquer :

$$L = B_i + R_{Ib} \quad \text{et} \quad r_{Ib} \% = \frac{R_{Ib}}{L} = 1 - \frac{B_i}{L}$$

On note B_i la distance inter-bandes et R_{Ib} le recouvrement inter-bandes :

Tant que $R_{Ib} = 20\%$ donc $B_i = 0.8 \times L$

Pour $L = 19.5\text{m}$ $B_i = 15.6\text{m}$ $R_{Ib} = 3.9\text{m}$

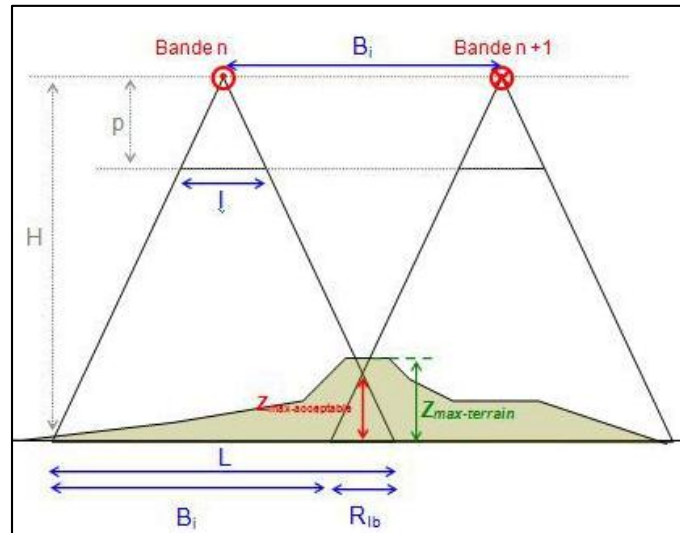


Figure 19 : Les différents paramètres de prise de vues aérien

La qualification de la configuration stéréoscopique de la prise de vue se base sur le rapport entre la base stéréoscopique et l'éloignement (distance entre la caméra et la scène). Ce rapport dépend directement de l'angle de champ (FOV) de caméra : plus le champ est large, plus ce rapport sera élevé, plus la précision altimétrique sera proche de la précision planimétrique.

La précision en altimétrie dépend de la précision de pointé stéréoscopique mais également du rapport entre **l'éloignement des sommets de prise de vues (B : base terrain)** et la **distance de la scène (H)** : le rapport B/H a une influence sur la précision de reconstruction en altimétrie ou en profondeur. Ce rapport dépend du format de la surface sensible, du recouvrement longitudinal et de la focale.

Pour une bonne configuration stéréoscopique le rapport **(B/H)** doit être proche de la valeur **(1/3=0.33)**. [ANTOINE PINTE, 2015]

$$\frac{B}{H} = (1 - r_c\%) \frac{\alpha}{F} \quad \text{Formule.5}$$

On note : α (l'ouverture angulaire) ; F (distance focale) ; r_c (recouvrement longitudinale en %)

Pour l'application de notre cas avec l'éloignement de 15m :

$$\frac{B}{H} = \frac{4.38}{15} = 0.29$$

Ces paramètres du recouvrement de la photographie qui sera prise, permettant de planifier la mission de prise de vue, pour déterminer le minimum de nombre des photographies à prendre. [ANTOINE PINTE, 2015]

II.2. Technique de prise de vue

II.2.1. Photogrammétrie aérienne

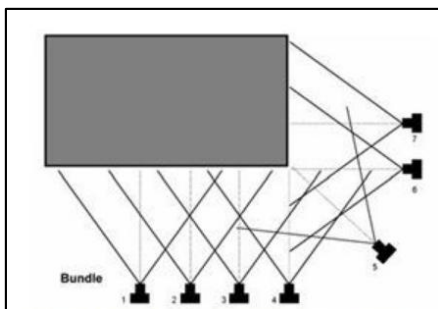
La prise de vues aériennes est une technique qui consiste à prendre des photographies de la surface de la terre depuis un véhicule aérien. La plus parts des prises de vues aériennes sont à un axe vertical [LAURE CHANDELIER, 2011].

II.2.2. Photogrammétrie terrestre

En photogrammétrie terrestre, on cherche à reproduire la géométrie de l'acquisition aérienne, tout d'abord en découpant la scène à restituer en différents plans puis en couvrant chaque plan d'une ou plusieurs bandes selon le cas. Contrairement à la photogrammétrie aérienne l'axe de prise de vue ne doit pas être toujours vertical.

II.2.2.1. Cas standard (Parcours linéaire)

C'est de prendre des photos à axe parallèle et perpendiculaire à la scène observée, les photos sont réalisées en ligne pour assurer le recouvrement entre les images.



Si la surface à photographier présente un angle, comme un angle de mur, il faudra amorcer un mouvement autour de l'angle pour relier les deux surfaces, comme présentée dans le schéma en face (figure 18). Ce mouvement devra toujours respecter un recouvrement minimum de 75 %. [LAURE CHANDELIER, 2011].

Figure 20 : Méthode standard d'acquisition terrestre

II.2.2.2. Cas convergent

Pour les scènes que l'on peut difficilement découper en plans (scènes autour desquels on doit tourner), il peut être réalisé une prise de vue convergente. [LAURE CHANDELIER, 2011]

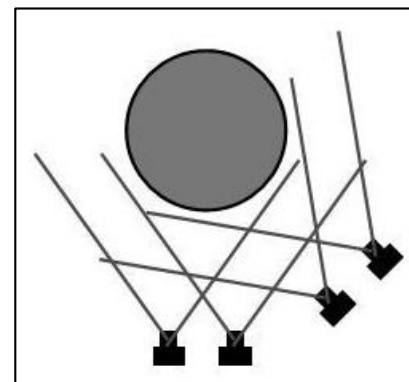


Figure 21 : Méthode convergente d'acquisition terrestre

II.2.2.3. Scènes complexes

La complexité géométrique de la scène va permettre de déterminer s'il faut augmenter le nombre de photographies à réaliser, par des acquisitions circulaires en faisant varier au besoin la hauteur de l'appareil photo et l'inclinaison en plongée ou contre-plongée, soit en prenant au minimum trois photos additionnelles en étoile là où se trouve un détail important dont la reconstruction peut s'avérer délicate pour le logiciel. [LAURE CHANDELIER, 2011]

II.3. Mise à l'échelle

Pour géoréférencer le nuage de points épars, nous utilisons les coordonnées des cibles posées au sol lors du travail de terrain, ces cibles correspondant à des points d'appui. Pour achever la planimétrie du modèle créé dans les logiciels photogrammétriques, il est possible (et recommandé) d'ajouter des échelles, information de distance supplémentaire permettant au modèle d'ajuster les distances prédites avec ces réalités de terrain.

Les points d'appui (ou points d'ajustage ou points de calage) sont des éléments matériels très importants. Ils sont essentiels pour l'aéro-triangulation et demandent une planification logistique et géographique précise pour garantir leurs visibilité pendant la prise de vues, l'acquisition de ces points réalisés soit par GPS ou tachéomètre.

Le nombre de points d'appui est essentiellement en fonction de la taille du bloc. Le nombre et surtout la disposition des points d'appui n'est pas une science exacte et, dans le doute, on préférera se placer du côté de la sécurité. [F. GERVAIX, FEVRIER 2010]

L'étape de détermination du nombre de GCP (Ground Control Point) nécessaires pour le géoréférencement correct des images est relativement complexe. En théorie, dans le cas d'une prise de vue sans pré-positionnement de camera (coordonnée terrain de camera : GPS RTK), il est préférable d'imposer au moins un point d'appui connu en planimétrie (X, Y) tous les 5/6 couples de photographies et de définir un point altimétrique pour chaque couple.

Attention à ce que la taille ou l'épaisseur du marquage soit compatible avec l'échelle de l'image ou la « GSD » [LECLERC.A, 2015].

D'une part, la mise à l'échelle du modèle se base sur des cibles imprimées ayant déjà été préalablement mesurées à l'aide de la station totale, leurs coordonnées doit être retranscrites dans les logiciels photogrammétriques. D'autre part on utilise des indicateurs de distance tel que : une canne ou planche en bois...dont leurs dimensions sont connues.

2^{ème} Partie : L'application des théories

II.1. Besoin de développement

La stéréo-préparation est la phase préparatoire de la prise de vues pour une mission photographique, cette préparation commence au niveau du bureau par le calcul des paramètres nécessaires à l'organisation de la prise de vues ; par la suite la création du plan d'acquisition (tableau d'assemblage)... et finie par l'établissement des points d'appui et de contrôle sur terrain.

Dans ce titre on va s'adresser aux travaux préparatoires au bureau qu'ils ont pris une durée plus ou moins importante, cette contrainte est résolue par le développement d'une extension (PLM 6.6) sous Visuel Basic pour Application sous l'Environnement d'AUTOCAD.

Donc notre extension aura garantie l'automatisation de ces travaux. Les paramètres de prise de vues seront déterminés selon les caractéristiques géométriques de la caméra (l'objectif) ; ces derniers sont :

- La taille de l'image sur terrain : pour donner la surface couverte par une seule photographie.
- La résolution spatiale : correspond à la taille de pixel sur terrain.
- La distance d'éloignement de caméra lors de la prise de vue.
- La base stéréoscopique : c'est la distance de déplacement entre deux positions successives de prise de vues dans la même bande.
- La distance inter-bande : c'est la distance de déplacement de camera entre les bandes successives.
- Les recouvrements longitudinaux et latéraux des photos.

II.2. Description de l'extension PLM6.6

Notre extension sera développée sur VBA-Autocad sous le nom **PLM6.6** (Planning Land Mission), leur objectif est l'organisation de la partie stéréo-préparation d'une mission de prise de vue terrestre dans le cas standard (Parcours linéaire) et le cas d'une scène circulaire.

Les valeurs qui seront obtenues par l'extension PLM6.6 émergent par les équations de stéréo-préparation, qu'ils ont été cités au niveau de le deuxième chapitre, la traduction de ces valeurs graphiquement nous donne un modèle de la mission (tableau d'assemblage) de prise de vue.

II.3. Les différentes tâches de l'extension PLM6.6 (pour les scènes à une seule face)

II.3.1. Calcul de surface observée

Le calcul de surface observée (zone ciblée par une seule photo) lors de la prise de vue se présente par deux méthodes. Parmi les paramètres influents sur la taille de la surface observée on trouve ; la distance focale, taille de l'image au niveau de capteur, la distance d'éloignement et la résolution spatiale.

✚ 1^{er} méthode : le calcul du surface observée se base sur l'aspect géométrique de l'objectif (distance focale, taille de l'image dans le capteur) + distance d'éloignement

⇒ Dans cette méthode l'extension nous permettre de calculer la résolution spatiale de l'image obtenue.

The screenshot shows the 'PLM 6.6' software window with the '1er Méthode' tab selected. The interface is divided into several sections:

- Navigation:** '1er Méthode', '2ème Méthode', 'Chevauchement et dessin', 'Object circulaire', 'A propos'.
- Section: Calcul taille d'image sur terrain, avec parametre du capteur + l'éloignement**
 - Données:**
 - Distance focale (mm): 6,3
 - Dimensions de l'image (mm): Longuer 6,16, Largeur 4,62
 - Distance d'éloignement (m): 3
 - Résultat:**
 - Longuer Terrain (m): 2,93
 - Largeur terrain (m): 2,2
 - Buttons:** 'Table de matière' and 'Calculer'.
- Section: Résolution Spatial (GSD)**
 - Données: Format capteur:**
 - Longuer (pixel): 4000
 - Largeur (pixel): 3000
 - Results:**
 - Longuer pixel (mm): 0,73
 - Largeur pixel (mm): 0,73
 - Button:** 'Calculer GSD'.

Figure 22 : Résultat taille d'image sur terrain par la première méthode

✚ 2^{ème} méthode : le calcul la surface observer se base sur la taille de l'image dans le camera (Format de capteur) et la résolution spatiale demandé.

⇒ Dans cette méthode l'extension nous permettre de calculer la distance d'éloignement nécessaire pour une certaine résolution spatiale bien déterminé.

PLM 6.6

1er Méthode | 2ème Méthode | Chevauchement et dessin | Object circulaire | A propos

Calcul taille d'image sur terrain, avec résolution photo

Données: Format capteur

Longuer (pixel) 4000

Largeur (pixel) 3000

Résolution Spatiale

SGD (mm) 0,73

Calculer

Résultat taille d'image

Longuer Terrain (m) 2,92

Largeur terrain (m) 2,19

Longuer Largeur

Dimensions de l'image (mm) 6,16 4,62

Distance focale (mm) 6,3

Table de matière

Résultat distance d'éloignement

Distance d'éloignement (m) 2,99

Calculer l'éloignement

Figure 23 : Résultat taille d'image sur terrain par la deuxième méthode.

II.3.2. Calcul des paramètres de recouvrement

La distance de recouvrement entre deux photos successive est la valeur la plus importante dans les applications photogrammétriques, notre extension PLM6.6 nous permet de calculer les différentes valeurs optimales de recouvrement longitudinal et latéral. Elle se présente comme paramètres :

- Base stéréoscopique : la distance de déplacement de camera entre deux photos successive de la même bande.
- Distance inter-bande : la distance de déplacement de camera entre la bande et l'autre.
- Distance recouvrement longitudinale : largeur de la zone commune entre deux photos successive de la même bande.
- Distance recouvrement inter-bande : largeur de la zone commune entre deux photos de deux bandes successive.

Les résultats du paramètre de recouvrement seront obtenus lors de la détermination de la valeur de recouvrement demandé en pourcentage, il faut que la surface observé doive être déjà calculée par une des deux méthodes.

Recouvrement

Recouvrement longitudinale (%)

Recouvrement inter-bande (%)

Paramètre recouvrement en (m)

Base stéréoscopique

Distance inter-bande

Distance recouvrement longitudinale

Distance recouvrement inter-bande

Figure 24 : Calcul du paramètre de recouvrement

II.3.3. Création du tableau d'assemblage

Il se fie d'ajouter la longueur et la largeur de la scène de notre application pour calculer automatiquement le nombre des photos et le nombre des bandes nécessaire pour la prise de vues. Dans cette étape on a transformé les résultats précédents sous forme graphique sous Autocad.

Dessin

Longueur scène

Largeur scène

Nombre photos

Nombre bandes

Figure 25 : Interface de calcul nombre photos et la génération des dessins

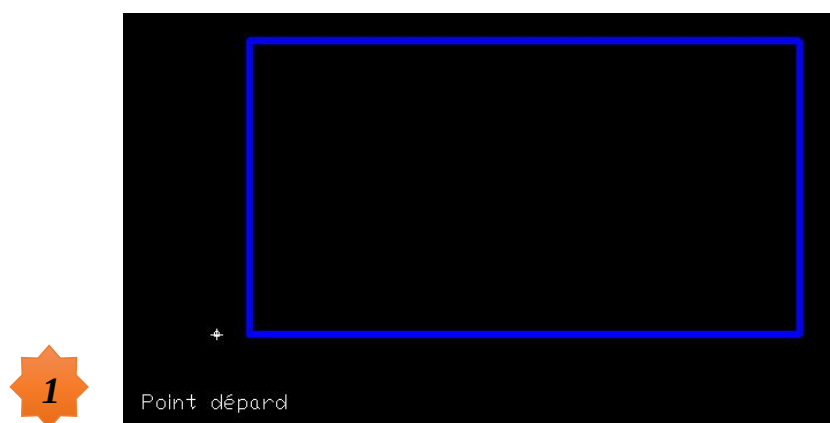


Figure 26 : Dessin automatique de la scène à observer

Dessiner limite : cette commande dessine les limites de la scène liée aux dimensions qu'ils sont insérés dans les cases (champs texte) **longueur scène** et **largeur scène**, avec un point de départ situé en bas sur le côté gauche de la scène pour assurer le recouvrement des photos sur toute la zone d'étude.

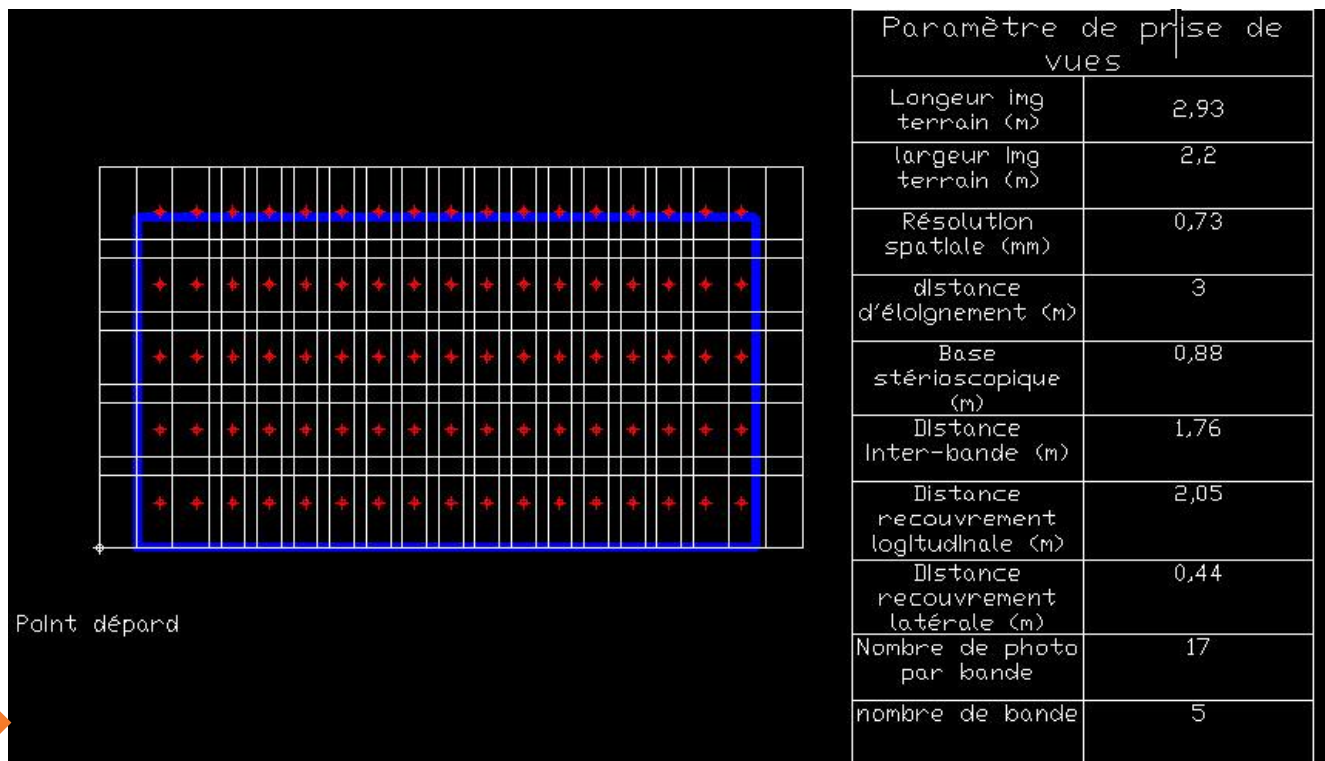


Figure 27 : Tableau d'assemblage de la mission de prise de vues.

II.4. Les différentes tâches de l'extension PLM6.6 (pour les scènes circulaires)

II.4.1. Calcul de distance d'éloignement

Pour les scènes circulaires on a ajouté le diamètre de la scène à observer ou une valeur proche de celle-ci, au but d'assurer une distance d'éloignement confortable.

Et par la suite la distance d'éloignement sera calculé à bases des différents paramètres de la caméra (Distance focale, dimension de l'image au niveau de camera) avec le diamètre de notre scène.

II.4.2. Calcul de la taille d'image sur terrain

Cette valeur sera calculée par la **formule.2** qu'il est présenté au niveau du deuxième chapitre, à base du théorème de Thalès.

II.4.3. Calcul de nombre de bande

Cette valeur sera calculée par une simple formule de division entre la hauteur de la scène et la largeur de l'image sur terrain, pour avoir le nombre de bande suffisant à la couverture complète de la scène.

II.4.4. Calcul de la base stéréoscopique

C'est la distance de déplacement de camera entre deux photos successive de la même bande, elle est calculé par la **formule.4** (au niveau de la deuxième chapitre), telle que la valeur de recouvrement pour les scènes circulaire a été fixé à 66% pour le recouvrement longitudinale.

II.4.5. Dessin des résultats

La dernière tâche consiste à traduire les valeurs calculées sous format graphique, pour avoir le tableau d'assemblage de la prise de vue des scènes circulaires.

Le tableau d'assemblage présente :

- La limite de la scène observée entourée en bleu.
- Le champ de visé pour chaque position.
- L'axe de prise de vu.

PLM 6.6

1er Méthode | 2ème Méthode | Chevauchement et dessin | Object circulaire | A propos

Calcul de distance d'éloignement

Données

Distance focale (mm) : 6,3

Dimensions de l'image (mm) : Longueur 6,16, Largeur 4,62

Diamètre de scène (m) : 6

Hauteur d'objet (m) : 10

Recouvrement fixe

Double recouvrement = 66%

Triple recouvrement = 33%

Résultat

Distance d'éloignement (m) : 3,07

Calculer

dessiner

Table de matière

Résultat des paramètres

Calculer

Longueur de l'image sur terrain (m) : 3

Largeur de l'image sur terrain (m) : 2,25

Taille capteur, longueur : 4000

SGD (mm) : 0,75

Base stéréoscopique (m) : 3,18

Nombre des bandes : 5

Figure 28 : l'interface de stéréo-préparation pour une scène circulaire

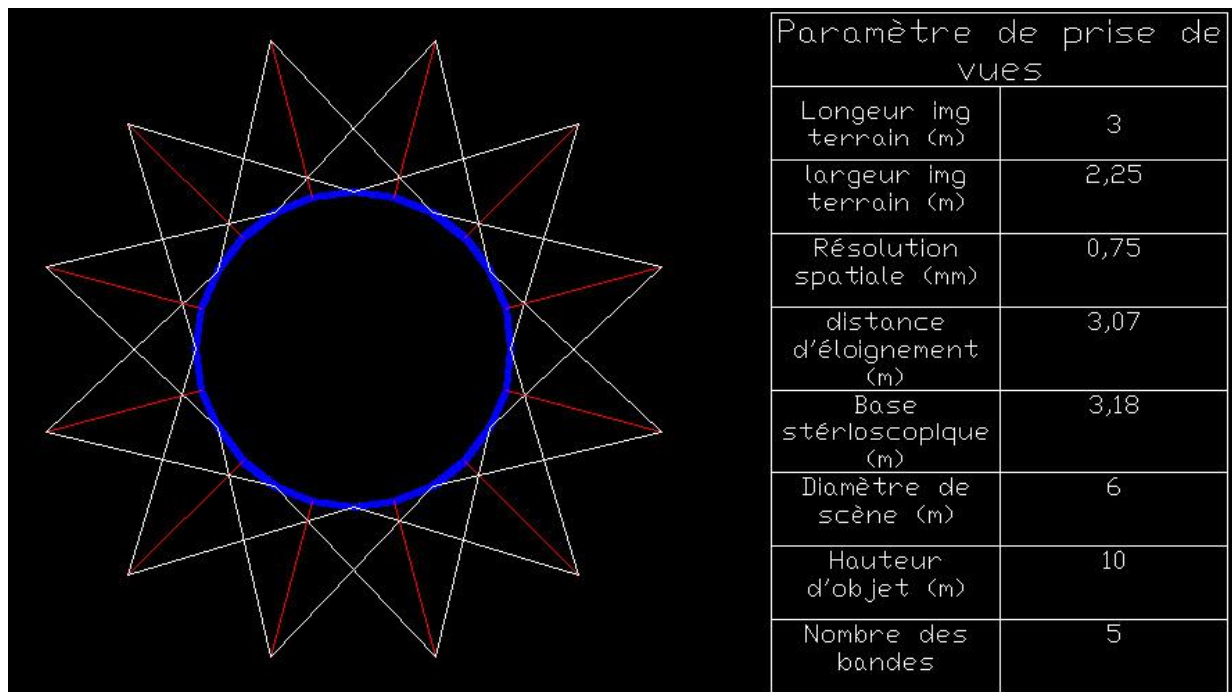


Figure 29 : Tableau d'assemblage de la mission de prise de vues d'une scène circulaire

II.5. Quelques codes source de l'extension PLM6.6

Pour la création d'un rectangle selon longueur et largeur donnée :

```

pi = 3.14159265358979
UserForm1.Hide
If TextBox10.Text = "" Then

    pt1 = ThisDrawing.Utility.GetPoint(, "point bas gauche:")
    Pt2 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(pt1, 0, Val(TextBox19.Text))
    Pt3 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(Pt2, pi / 2, Val(TextBox20.Text))
    Pt4 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(pt1, pi / 2, Val(TextBox20.Text))

    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine pt1, Pt2
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt2, Pt3
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt3, Pt4
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt4, pt1
Else

    pt1 = ThisDrawing.Utility.GetPoint(, "point bas gauche:")
    Pt2 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(pt1, 0, Val(TextBox10.Text))
    Pt3 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(Pt2, pi / 2, Val(TextBox11.Text))
    Pt4 = ThisDrawing.Utility.PolarPoint(pt1, pi / 2, Val(TextBox11.Text))

    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine pt1, Pt2
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt2, Pt3
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt3, Pt4
    ThisDrawing.ModelSpace.AddLine Pt4, pt1

End If

```

Figure 30 : codes sources d'un rectangle

Pour le changement de taille et couleur de ligne :

```
' Change the linewidth for the line
lineObj1.Lineweight = acLnWt060
lineObj2.Lineweight = acLnWt060
lineObj3.Lineweight = acLnWt060
lineObj4.Lineweight = acLnWt060

' Change color for the line
Dim color As AcadAcCmColor
Set color = AcadApplication.GetInterfaceObject("AutoCAD.AcCmColor.17")
Call color.SetRGB(0, 0, 255)

lineObj1.TrueColor = color
lineObj2.TrueColor = color
lineObj3.TrueColor = color
lineObj4.TrueColor = color
```

Figure 31 : code sources de style ligne

La création d'un bloc :

```
Set oSset = ThisDrawing.SelectionSets.Add("$MakeBlock$")
ThisDrawing.Utility.Prompt (vbCr & "Select objects to make block")

insPt = ThisDrawing.Utility.GetPoint(, vbCr & "Pick insertion point: ")
blkName = InputBox(vbCr & "Enter block name: ", "Block Name")

Set blkDef = ThisDrawing.Blocks.Add(insPt, blkName)

ReDim objColl(0 To oSset.Count - 1) As Object

For i = 0 To oSset.Count - 1
    Set objColl(i) = oSset.Item(i)
Next

ThisDrawing.CopyObjects objColl, blkDef

oSset.Erase

Set blkref = ThisDrawing.ModelSpace.InsertBlock(insPt, blkName, 1, 1, 1, 0)
Set oSset = Nothing
Err_Control:
MsgBox Err.Description
```

Figure 32 : codes sources d'un bloc

II.6. Vérification de l'extension PLM6.6

Afin de vérifier la précision de l'extension PLM 6.6, on a procédé une simple expérience qu'ils nous permettent de comparer la taille de l'image réelle avec celui donnée par le calcul.

Pendant la réalisation de l'expérience, on a pris une photo à une distance d'éloignement bien déterminé (80cm), par la suite cette image sera mise à l'échelle sur Autocad par la fonction aligné. Ensuite une vérification de la taille de l'image par rapport au résultat de l'extension PLM6.6 est détaillée sous-dessous.

II.6.1. Matériel utilisé dans l'expérience

- Mètre à rouleau magnétique.
- Caméra numérique Samsung ES60.
- Tranche en bois : pour la mise à l'échelle de photo sur Autocad.

II.6.2. Méthodologie

- ✚ On a placé la camera à une distance de 80 cm de la tranche de bois et prend une photo.



Figure 33 : Prise de vue pour la vérification des calculs

- ✚ On a vérifié la longueur de la tranche de bois (la mise à l'échelle sera faite à base de la longueur de la planche)



Figure 34 : Mesure de la planche de calibrage

- ✚ On a mesuré la taille (longueur et largeur) de l'image après la mise à l'échelle sous Autocad.

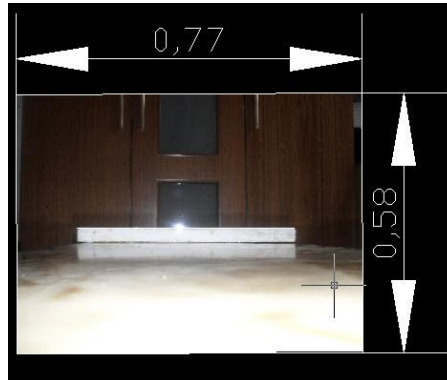


Figure 35 : Capture d'écran pour la dimension d'image sur Autocad

- ⇒ Le résultat sur Autocad est **0.77m** de longueur et **0.58m** de largeur.
- ✚ On passe au calcul du taille (longueur et largeur) de l'image sur notre extension-Autocad PLM6.6 :

Calcul taille d'image sur terrain, avec parametre du capteur + l'éloignement

Données

Distance focale (mm)

Longuer Largeur

Dimensions de l'image (mm)

Distance d'éloignement (m)

Résultat

Longuer Terrain (m)

Largeur terrain (m)

Figure 36 : La taille de l'image calculée par l'extension PLM 6.6

- ⇒ Le résultat sur l'extension PLM6.6 est **0.78m** de longueur et **0.59m** de largeur

II.6.3. Conclusion

Donc on trouve une erreur de 1 mm entre le calcul et la mesure, ce qui confirme la fiabilité des résultats obtenue par l'extension-Autocad PLM6.6, qui garantir les autres calculs qui sont basés sur le résultat de la taille d'image sur terrain.

II.7. Logiciels et Matériels à utilisés

II.7.1. Logiciels

II.7.1.1. Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan est une solution avancée de modélisation 3D à base d'images visant à créer du contenu 3D de qualité professionnelle à partir d'images fixes. Basé sur la dernière technologie multi-vue de la reconstruction 3D, PhotoScan fonctionne avec des images arbitraires et efficace dans les deux conditions contrôlées et non contrôlées. Les photos peuvent être prises à partir de n'importe quelle position, à la condition que la scène à reconstruire soit visible sur au moins deux photos. L'alignement de l'image et la reconstruction d'un modèle 3D sont entièrement automatisés. [HELP, AGISOFT 1.3]

Les traitements généraux d'Agisoft :

- Calibration des photos
- Alignement des photos
- Construire d'un nuage de points dense
- Construction de maillage
- Construction d'une texture pour le modèle
- Exportation des résultats

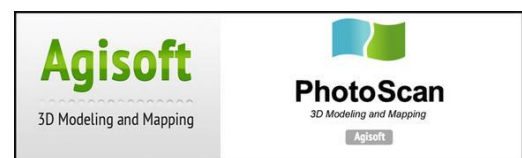


Figure 37 : Logo Agisoft

II.7.1.2. 3DReshaper

3DReshaper est un logiciel abordable et simple d'utilisation dédié au traitement de nuages de points pour de nombreuses applications telles que la sauvegarde du patrimoine, l'art, l'architecture, la géologie, les mines et les carrières, la modélisation numérique de terrain, la génie civil... [SITE WEB OFFICIEL : WWW.3DRESHAPER.COM]

Il comprend un grand nombre de fonctionnalités parmi lesquelles :

- Contrôle et mesuré des inspections
- Retro-conception / CAO
- Nuages de points
- Alignement et recalage
- Maillage 3D...



Figure 38 : Logo 3DReshaper

II.7.2. Matériels

II.7.2.1. GPS GeoMax Zenith25

Solution composée du récepteur GNSS RTK de précision millimétrique Geomax Zenith 25 Pro. Équipé d'une technologie avancée, le récepteur GNSS Geomax Zenith 25 Pro autorise la prise en charge des constellations satellitaires actuelles GPS (USA) et Glonass (Russie)... Avec Modem GSM 3.75G intégré pour utilisation en Mobile.



Figure 39 : GPS GEOMAX

II.7.2.2. Caméra numérique

La camera Samsung ES60 est une compacte numérique de 12,2 Mégapixels. Elle dispose d'un zoom optique de 3x et d'une ouverture de F3.2-5.8 (Focale). Elle possède un écran couleur de 2.5 pouces et une résolution de 230 000 pixels, pèse 116 g et utilise une batterie Lithium Ion.

Tableau.5 : Caractéristiques de la camera Samsung ES60

Capteur d'images	• Type Capteur : CCD • Filtres couleurs : RGB • Nombre de pixels total : 12,2 Mégapixel • Taille du capteur : 1/2.33 pouce (environ 7,81 mm)
Objectif	• Distance focale : Objectif Samsung f = 6,3 - 18,9 mm • Longueur focale : 35-105 mm • Zoom numérique : 3 x • Mise au point automatique : Oui • Distance (normal-macro) : 80-infinity, 10-80 • Balance des blancs : Auto, Preset (Daylight, Cloudy, Fluorescent H, Fluorescent L, boiled lights, Custom) • Ouverture : F3.2-5.8
Vitesse d'obturation de l'objectif	• Automatique : 1/8 - 1/1 500 s • Programme : 1 - 1/1 500 s • Nuit : 8 - 1/1 500 s • Feux d'artifice : 2 s
Sensibilité :	• Sensibilité (ISO equivalent.) : 80/100/200/400/800/1600
Formats de fichiers	JPEG (EXIF v. 2.21)
Resolution	• Pixels effectifs : 12,2 Mégapixels • Résolution maximum : 4000x3000 pixels • Résolution photo : 4000x3000, 3968x2232, 3984x2656, 3264x2448, 2592x1944, 2048x1536, 1920x1080, 1024x768 pixels

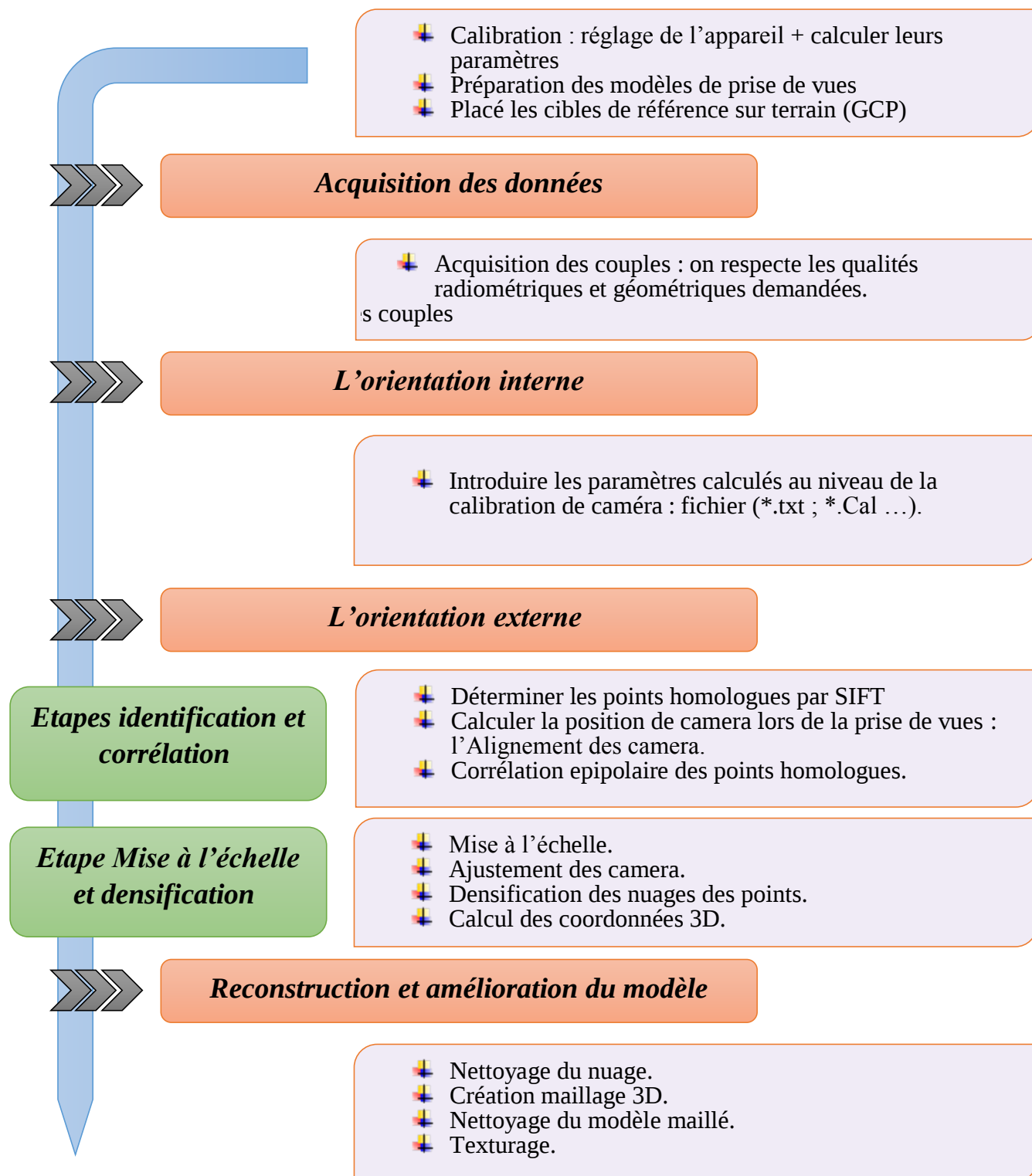
II.8. Conclusion

La première partie théorique s'articule sur le réglage de l'appareil photo, calcul des paramètres de prise de vues et les techniques d'acquisitions et de la compréhension et l'application des travaux préparatoires d'une prise de vues photogrammétrique ; nous oriente vers le développement L'extension PLM 6.6 qui va être garantir les calculs de la mission de stéréo-préparation pour accélérer les travaux préparatoires de la prise de vues. En outre cette dernière dessinait les résultats graphiquement au but de préparer le tableau d'assemblage, même les importants paramètres de la mission seront affichés dans un tableau. Cette extension va simplifier et accélérer les travaux bureau.

Chapitre III :

Les travaux topographiques de projet

Organigramme du traitement photogrammétrique par les logiciels de photo-modélisation



1^{er} Partie : Procédures de traitement

III.1. Introduction

La première étape, PhotoScan détecte les points dans les photos sources qui sont stables en fonction des points de vue et des variations d'éclairage et génère un descripteur pour chaque point en fonction de son voisinage local.

Ces descripteurs sont utilisés plus tard pour détecter les correspondances entre les photos. Ceci est similaire à l'approche SIFT bien connue, mais utilise des algorithmes différents pour une qualité d'alignement un peu plus élevée. [DMITRY SEMYONOV, 2011]

III.2. Méthodes développées pour la détection

Ces traitements photogrammétriques nécessitent la détermination des points homologues entre les différentes images. Originellement, ces points étaient sélectionnés manuellement. Cependant les avancées de l'informatique ont rendu possible une détection et une mise en correspondance automatique des points. Les avantages offerts par ces détecteurs sont nombreux : gain de temps, précision indépendante de l'utilisateur... parmi ces solutions on trouve :

Le détecteur **SIFT** (Scale-Invariant Feature Transform) a été créé en 1999 par le chercheur David Lowe de l'Université de Colombie Britannique. Il est constitué d'un algorithme de détection des points d'intérêt, du calcul d'un descripteur pour chacun de ces points, puis de la mise en correspondance proprement dite.

Le détecteur **SURF** (Speeded Up Robust Feature) est un algorithme de détection développé par les chercheurs de l'université de Louvain et l'ETH Zurich. Il s'inspire du détecteur SIFT, mais a été développé pour être plus rapide. [THIBAUT DUDKA, 2015]

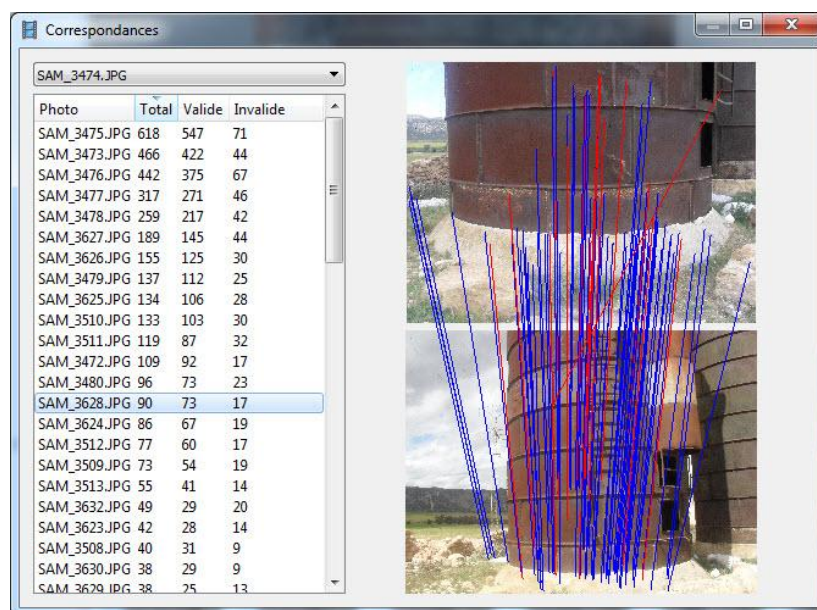


Figure 40 : Résultat détection des points homologues par Agisoft

III.3. Les orientations photogrammétriques

Pour la résolution des paramètres d'orientation intrinsèque et extrinsèque de la caméra, PhotoScan utilise un algorithme glouton pour trouver des emplacements de caméra approximatifs et les affine plus tard en utilisant un algorithme d'ajustement de paquet. Cela devrait avoir beaucoup de choses en commun avec Bundler, même si nous n'avons pas comparé notre algorithme avec Bundler. [DMITRY SEMYONOV, 2011]

Bundler : développé par l'université de Washington et Microsoft dans le langage C et C++. Il a été conçu pour le projet Microsoft Photo Tourism et fonctionne sur la base de la **SFM** (Structure from motion). Le logiciel utilise l'algorithme SIFT, permet l'utilisation de paramètres de calibration, et calcule l'orientation des images ainsi qu'une légère densification à la suite du « bundle block adjustment ». [NOLWENN QUERE, 2013]

III.3.1. Calcul de la matrice fondamentale

Le fichier EXIF, des images sert de valeurs approchées pour calculer la configuration possible de deux caméras et leur géométrie épipolaire correspondante. La géométrie épipolaire d'une paire d'images peut être exprimée par une matrice 3 x 3 appelée matrice fondamentale. Elle décrit les positions et orientations relatives des deux caméras ainsi que leurs paramètres internes. La matrice fondamentale contient donc les matrices intrinsèque et extrinsèque. Agisoft utilise RANSAC* pour déterminer la matrice fondamentale pour chaque paire d'images. [NOLWENN QUERE, 2013]

*RANSAC : *RAN*dom *SA*mple *C*onsensus, algorithme pour l'extraction des formes en dessinant aléatoirement des portions minimales à partir des points et en construisant les formes primitives correspondantes.

III.3.2. Orientation interne

L'**orientation interne** cherche à déterminer les paramètres de calibrations de l'appareil photo : la focale, le centre principal d'autocollimation, le polynôme de distorsion et le centre principal de symétrie. L'orientation interne est ce qui permet de rétablir une gerbe de rayons à partir de la photographie en tenant compte des distorsions dues à l'objectif. [JULIA CHEMINADE, 2015]

III.3.3. Orientation externe

L'**orientation externe** permet de connaître la position et l'orientation des prises de vue dans l'espace. Elle peut être définie de deux façons :

L'orientation en deux étapes, dans laquelle on détermine d'abord l'orientation relative qui permet de déterminer la position des images les unes par rapport aux autres dans un espace euclidien sans échelle. Puis on calcule l'orientation absolue en faisant passer les points 3D dans un référentiel connu à partir des coordonnées des points-objets.

III.4. Reconstruction de surface dense

A cette étape, plusieurs algorithmes de traitement sont disponibles. Les méthodes Exact, Smooth et Height-field sont basées sur un calcul de carte de profondeur par paire, tandis que la méthode Fast utilise une approche multi-vue. [DMITRY SEMYONOV, 2011, AGISOFT] [3]

III.4.1. Corrélation dense

La corrélation épipolaire dense (CED) est un principe fondamental de la stéréoscopie qui consiste à reconstituer, par pointé commun sur deux photographies, un objet en 3 dimensions, sans aucune autre information sur l'objet que les photographies. C'est donc une technique dite passive. Le but de la CED est de déterminer pour chaque région (pixel ou groupe de pixels) d'une image la position du même objet dans l'autre image. A partir de là, une triangulation permet de reconstituer les coordonnées 3D de chaque point. [JEAN, 2009]

MVS, Multi View Stereo, est une méthode produisant un nuage de points 3D dense à partir d'images et de leurs paramètres de caméra. La plupart des algorithmes MVS reconstruisent un modèle 3D global à partir de toutes les images simultanément. Cette méthode est limitée par le nombre de photographies et ne peut, bien souvent, pas être appliquée pour les scènes larges comprenant un important volume de données. [JEAN, 2009]

III.5. Maillage 3D

Dans cette méthode, un maillage est réalisé à partir du nuage de points densifié, et servira de référence. De nombreuses méthodes existent pour réaliser cette transformation. Les plus communes se basent sur l'algorithme de triangulation de **Delaunay**. [JEAN, 2009]

2^{ème} Partie : Travaux d'inspection

III.1. Définition de l'intervention

Cette application concerne l'intégration des méthodes photogrammétriques dans le diagnostic des ouvrages. Nous cherchons à inspecter un réservoir par les techniques de la photogrammétrie rapprochée (terrestre) pour élaborer des recommandations relatives à l'inspection et à la maintenance de cet ouvrage (silo de stockage).

L'auscultation c'est une opération cyclique pour aboutir à un diagnostic sur la pathologie des ouvrages, ce qui prend plus de trois mois entre une observation et une autre. Tandis que la période de déroulement du projet de fin d'études elle est très limitée pour faire une application d'auscultation (deux inspections séparées d'une période de 3 mois au minimum).

Donc nous décidons de faire une inspection sur un vieil ouvrage hors exploitation au but de détermineront leurs déformations géométriques par l'application des procédures photogrammétriques.

III.2. Définition de l'objet a inspecté

L'ouvrage qui était sélectionné pour le travail d'inspection est un silo de stockage d'ensilage dans une ferme agricole installée près de la région de GAAFOUR, gouvernorat SILIANA de la république tunisienne. Ce silo de stockage a été construit par la colonisation française depuis l'année 1920.

Cette zone est localisée approximativement dans les coordonnées géographiques de $36^{\circ}31'57.96''N$ de latitude et $10^{\circ}26'59.26''E$ de longitude (Figure10). À une distance de 4km de la ville GAAFOUR.



Figure 41 : Localisation de l'objet a inspecté

III.3. Préparation de prise de vues

III.3.1. Reconnaissance de terrain

On a préparé une sortie préliminaire sur site pour constater quelques informations sur l'objet à inspecter, concernant l'accessibilité de l'ouvrage pour sélectionner la méthode de prise de vues et organiser la mission d'acquisition.

On a constaté que l'entourage de l'ouvrage va assurer une bonne mission de prise de vues sauf un angle qui est confiné par un autre silo de stockage. Aussi on a trouvé que ce silo de stockage est très élevé, ce qui peut présenter un problème d'acquisition pour la partie supérieure.

Le squelette de ce silo présent des formes remarquables peut les prendre comme des points de contrôle, pour la mise à l'échelle de l'objet au niveau du traitement et éviter l'implantation des cibles de repérage.

III.3.2. Préparation bureau

III.3.2.1. Préparation de matériel

Il faut régler les paramètres de caméra (Samsung ES60) pour assurer une meilleure qualité de prise de vue, cette étape se sera finie quand on applique les paramètres qui ont été indiqué dans le tableau N°3 du deuxième chapitre.

III.3.2.2. Préparation du plan de la mission

La mission de prise de vue sera planifiée par notre extension-Autocad **PLM 6.6**, pour optimiser le nombre des photos et assurer une le meilleur recouvrement de l'objet et déterminer ces paramètres :

- La distance d'éloignement souhaitée
- Le nombre des photos pour chaque bande
- Les axes de prise de vues.
- Le nombre des bandes.
- Base stéréoscopique (distance entre deux photos successives).

Le silo de stockage ayant un périmètre de 13.72m, on peut diviser ce chiffre par 3.14 (π) pour avoir le diamètre, qui est 4.36m.

Il suffit d'ajouter les données demandées par l'extension PLM 6.6, comme la distance focale et la taille de l'image au niveau de l'appareil..., pour avoir le tableau d'assemblage de la mission de prise de vues avec un tableau des paramètres détaillé concernant notre mission.

III.3.2.3. Les résultats

-  La distance d'éloignement souhaité environ 4.5m
-  Nombre des bandes égale à 4
-  Le nombre des axes est fixé à 12 avec un recouvrement de 66% dans toutes les conditions, ce qui assure 30° entre deux axes successifs.
-  La base stéréoscopique souhaitée correspond à 2m.

1er Méthode | 2ème Méthode | Chevauchement et dessin | Page5 | Object circulaire

Calcul de distance d'éloignement

Données

Distance focale (mm) : 6,3

Dimensions de l'image (mm) : Longueur 6,16 | Largeur 4,62

Diamètre de scène (m) : 4,36

Hauteur d'objet : 11

Recouvrement fixe

Double recouvrement = 66%

Triple recouvrement = 33%

Résultat

Distance d'éloignement (m) : 4,46

Calculer

dessiner

Résultat

Calculer

Largeur terrain (m) : 3,27

Nombre des bandes : 4

Base stéréoscopique (m) : 2,09

Figure 42 : Résultat théorique de la mission de prise de vue

Le bouton « **dessiner** » crée un modèle de la mission de prise de vues :

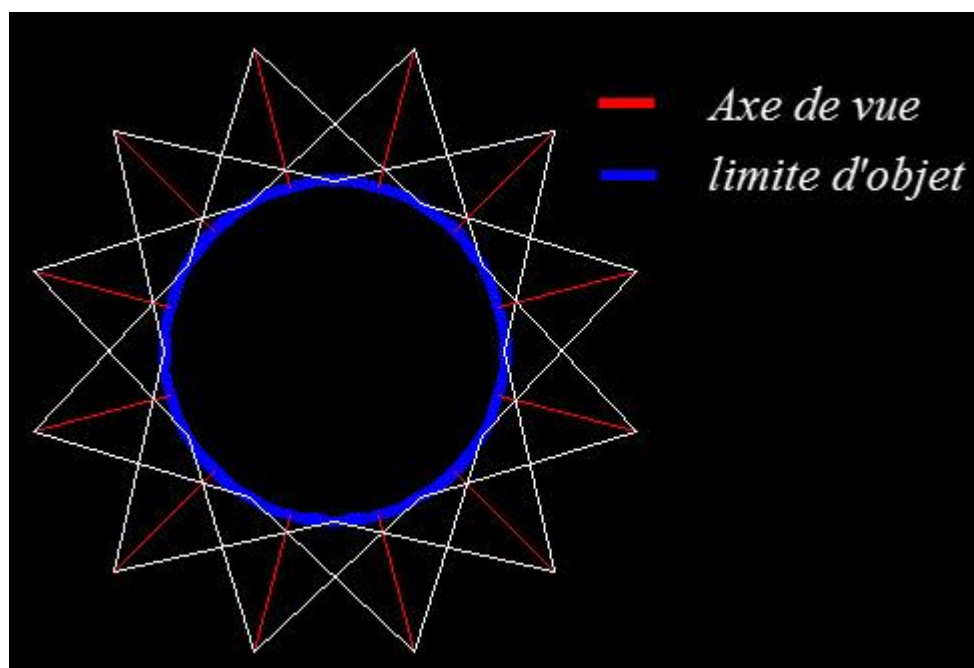


Figure 43 : Résultat graphique du modèle de la mission de prise de vues

III.4. Mission de prise de vues

Le jour de terrain on a utilisé un mètre à rouleau magnétique et une caméra numérique (Samsung ES60). À une distance plus ou moins de 4,5m, on a pris des séries de photos selon des axes presque horizontaux autour de silo de stockage.

Le recouvrement est assuré en respectant une base stéréoscopie de 2m.

Les problèmes de prise de vues :

- ❖ La condition de perpendicularité doit être respectée juste pour la première et la deuxième bande, à cause de la hauteur de l'objet.
- ❖ La lumière n'est pas uniforme car le ciel est peu dégagé.
- ❖ Sur-éclairage (reflet de lumière du soleil) lorsque on vise vers le haut.
- ❖ Pour quelques angles on ne peut pas garantir la distance d'éloignement demandé.



Figure 44 : le silo de stockage

Le problème d'éloignement pour quelques positions de prise de vues, il exige une réinitialisation des axes de prise de vue, pour assurer un bon recouvrement.

On a terminé cette mission de prise de vue avec 113 photos. Avant de quitter le terrain il faut vérifier la qualité des photos.

III.5. Traitement des données

III.5.1. Sous Agisoft PhotoScan

C'est un logiciel de photo modélisation basé sur le principe de stéréoscopie pour modéliser l'effet de relief l'aide de deux images de points de vue différents pointant une même scène.

III.5.1.1. Calibration de la camera

La calibration de camera présente comme première traitement appliqué sur les photos au niveau du logiciel Agisoft, cette calibration déjà préparée (deuxième chapitre), il se fit d'introduire le fichier d'étalonnage préparé sous Agisoft Lens.

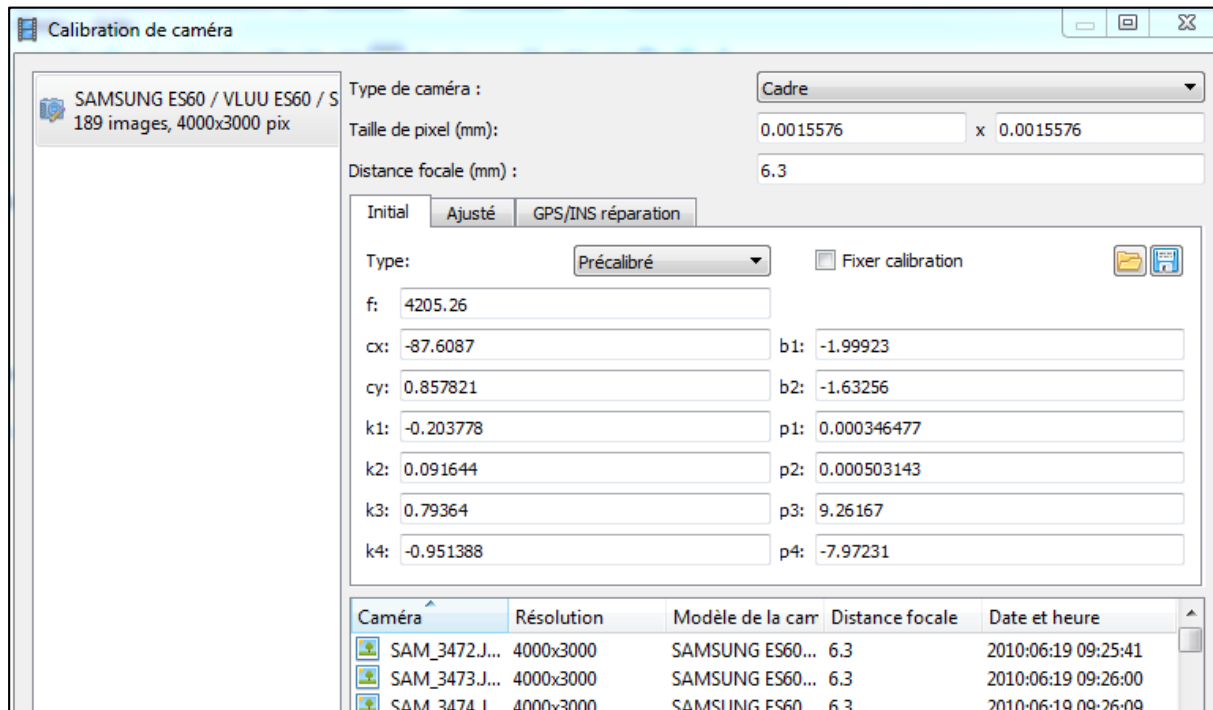


Figure 45 : Calibration de la camera sous Agisoft

III.5.1.2. Alignement des photos

À ce stade, PhotoScan trouve la position des caméras et l'orientation de chaque photo, et construire un modèle en nuage de points clairsemé. L'alignement ayant été achevé, les positions de caméra calculées et un nuage de points clairsemé seront affichés. Vous pouvez inspecter le résultat de l'alignement et supprimer les photos mal positionnées. [HELP, AGISOFT 1.3]



Figure 46 : Boîte de dialogue d'alignement des photos sous Agisoft

Ces paramètres de la procédure d'alignement des photos peuvent être modifiés, on trouve :

Précision : Le logiciel travaille en haute précision avec les photos originales telles qu'elles sont, le réglage moyen entraîne la réduction des images par un facteur de 4, et les fichiers sources en basse précision sont réduits de 4 fois plus. [HELP, AGISOFT 1.3]

Limite de points : Le nombre indique sur chaque image la limite supérieure de points caractéristiques prise en compte lors du traitement en cours.

PhotoScan détecte les points dans les photos sources qui sont stables en fonction des points de vue et des variations d'éclairage et génère un descripteur pour chaque point en fonction de son voisinage local. Ces descripteurs sont utilisés plus tard pour détecter les correspondances entre les photos. Ceci est similaire à l'approche SIFT bien connue, mais utilise des algorithmes différents pour une qualité d'alignement un peu plus élevée. [HELP, AGISOFT 1.3]

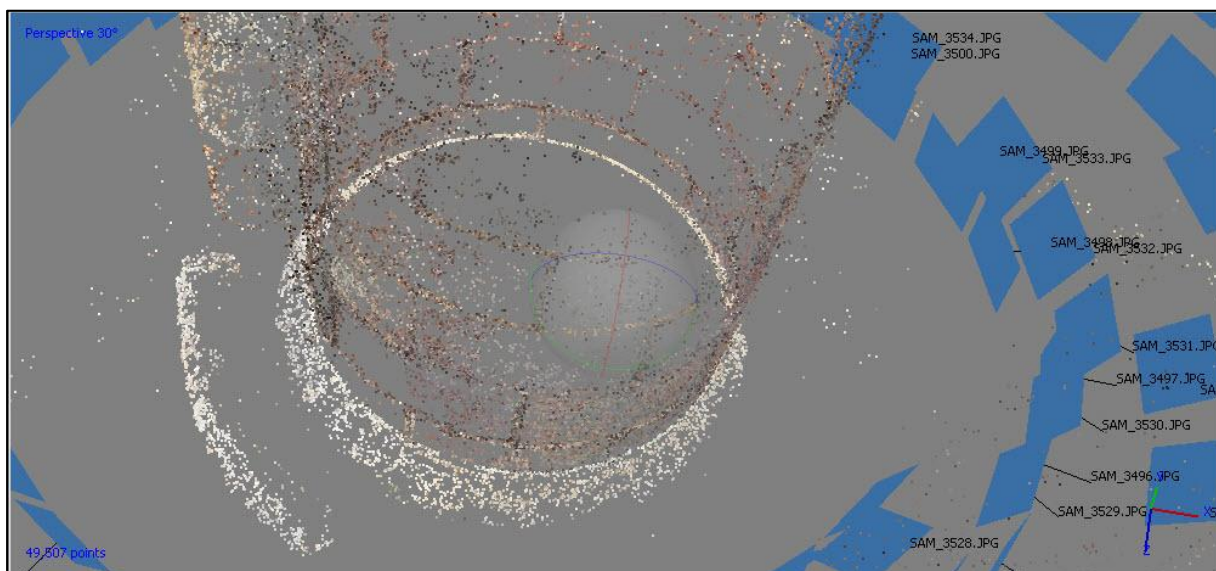


Figure 47 : le résultat d'alignement des photos

La qualité d'image :

Une source médiocre par exemple des photos vagues peuvent influencer en mal les résultats de l'alignement. Afin de vous aider à exclure les images mal focalisées du traitement, PhotoScan suggère une fonction automatique d'estimation de la qualité d'image. Il est recommandé de désactiver les images ayant une valeur de qualité de moins de 0,5 unités. [HELP, AGISOFT 1.3]

Etiquette	Taille	Aligné	Qualité	Date et h	Fabr	Modè	Distance focal	Ouverture	ISO	Temps de pc	Équivalent foc
 SAM_3474.J...	4000x3000	✓	0.811916	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3475.J...	4000x3000	✓	0.808246	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3476.J...	4000x3000	✓	0.8025	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3477.J...	4000x3000	✓	0.791086	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/250	35
 SAM_3478.J...	4000x3000	✓	0.786422	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/250	35
 SAM_3479.J...	4000x3000	✓	0.775975	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/250	35
 SAM_3480.J...	4000x3000	✓	0.79256	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3481.J...	4000x3000	✓	0.777366	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3482.J...	4000x3000	✓	0.787648	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/250	35
 SAM_3483.J...	4000x3000	✓	0.798994	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3484.J...	4000x3000	✓	0.756475	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/180	35
 SAM_3485.J...	4000x3000	✓	0.837112	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/8.4	200	1/125	35
 SAM_3486.J...	4000x3000	✓	0.800007	2010:06...	SA...	SA...	6.3	F/3.2	200	1/750	35

Figure 48 : paramètre de qualité des photos sur Agisoft

III.5.1.3. Nuage de points dense

Cette troisième étape permet d'éliminer le bruit tout en densifiant le modèle de points épars créé précédemment. Une fois le calcul de densification effectué, il est conseillé de supprimer les points aberrants du nuage dense.

PhotoScan permet de générer et de visualiser un modèle en nuage de points dense. Sur la base d'une approximation des positions des caméras, le programme calcule les informations de profondeur pour chaque caméra afin de les combiner en un seul nuage de points dense. PhotoScan tend à produire des nuages de points extrêmement denses. [HELP, AGISOFT 1.3]

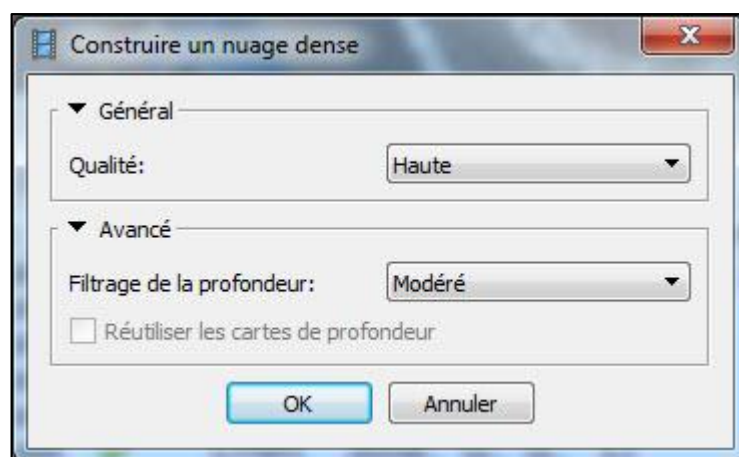


Figure 49 : Dialogue pour construire un nuage dense sous Agisoft

Qualité :

Pour indiquer la qualité de reconstruction souhaitée, des réglages de qualité plus élevés peuvent être utilisés pour obtenir des géométries plus précises et détaillées, mais nécessitent plus de temps pour s'exécuter. L'interprétation des paramètres de qualité est ici similaire à celle des réglages de précision mentionnés à la section Alignement des photos. La seule différence est que, dans ce cas, les photos originales entraîneront un traitement de Qualité Très élevé, alors que chaque étape de pré-traitement d'image implique une réduction de taille d'un facteur de 4. [HELP, AGISOFT 1.3]

Modes de Filtrage de la profondeur

Au stade de la reconstruction générant le nuage de points dense, PhotoScan calcule les cartes de profondeur pour chaque image. En raison de certains facteurs comme la mauvaise texture de certains éléments de la scène, ou d'images avec du bruit, ou mal ciblées, il peut se trouver certaines valeurs aberrantes entre les points.

Si la zone à reconstruire ne contient pas de petits détails significatifs, il est raisonnable de choisir le mode de filtrage de la profondeur Agressif pour régler la plupart des valeurs aberrantes.

Le mode de filtrage de la profondeur Modéré apporte des résultats qui se situent entre les approches légère et agressive. Vous pouvez expérimenter les réglages au cas où vous auriez des doutes quant au mode à choisir. [HELP, AGISOFT 1.3]



Figure 50 : Résultat de construction d'un nuage dense sous Agisoft

III.5.1.4. Mise à l'échelle du nuage des points

Agisoft propose des outils de géoréférencement à partir du nuage de points dense ou des photographies orientées. Soit par des coordonnées XYZ sont assignées par l'opérateur à chaque point 3D piqué, soit par les distances entre les points...

Dans notre cas on a implanté quelques points au niveau du nuage puis on a défini les distances réelles entre eux.

Repères	X (m)	Y (m)	Z (m)
☐ point 1			
☐ point 2			
☐ point 3			
Erreur totale			
Points de con...			
Points de véri...			

Barres d'échelle	Distance (m)	Précision (m)	Erreur (m)
☒ point 1_...	0.610000	0.001000	0.001188
☒ point 1_...	0.610000	0.001000	-0.001192
Erreur totale			
Barres d'éche...			0.001190
Barres d'éche...			

Figure 51 : Liste des points repères et barre d'échelle sous Agisoft



Figure 52 : Points repères implantés sur un nuage dense sous Agisoft

III.5.1.5. Création de maillage tridimensionnel

Ce processus permet de transformer le nuage des points en surface tridimensionnel, il consiste à relier les points par des surfaces triangulaires.

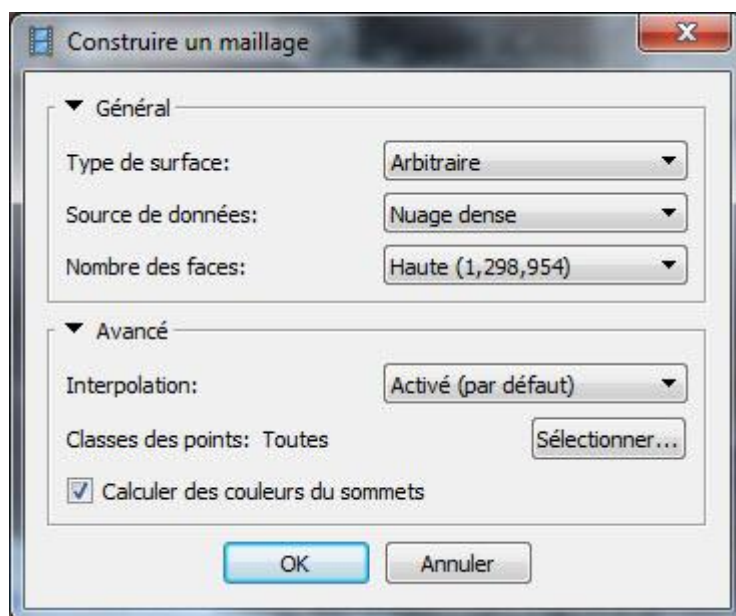


Figure 53 : Dialogue de construction d'un maillage

PhotoScan prend en charge plusieurs méthodes et paramètres de reconstruction, lesquels aident à produire des reconstructions optimales pour un ensemble proposé de données.

Type de surface :

- Le type de surface Arbitraire peut être utilisé pour la modélisation de tous types d'objets. Il doit être choisi pour des objets fermés comme des statues, des bâtiments, etc. Il ne fait pas d'hypothèse sur le type de l'objet modélisé, qui entraînerait une consommation de mémoire plus élevée.
- Le type de surface Champ de hauteur est optimisée pour la modélisation des surfaces planes, tels que des terrains ou des bas-reliefs. Il doit être choisi pour le traitement de photographies aériennes car il nécessite une faible quantité de mémoire et permet le traitement de plus grands ensembles de données. [HELP, AGISOFT 1.3]

Source des données :

Spécifie la source de la procédure de génération de maillage. Le nuage clairsemé peut être utilisé pour la génération rapide de modèle 3D. [HELP, AGISOFT 1.3]

Interpolation :

Si le mode d'interpolation est désactivé il conduit à des résultats de reconstruction précis puisque seules les zones correspondant aux points de nuage des points dense sont reconstruites. Un remplissage manuel des trous est généralement nécessaire à l'étape de post-traitement.

Avec le mode d'interpolation Activé (par défaut) PhotoScan interpolera des surfaces dans un cercle d'un certain rayon autour de chaque nuage de points dense. Par conséquent, des trous seront couverts automatiquement. Pourtant, certains trous peuvent encore être présents sur le modèle, et auront à être remplis à l'étape de post-traitement. Le réglage Activé (par défaut) est recommandé pour la production d'orthophotos. [HELP, AGISOFT 1.3]



Figure 54 : Résultat de construction du maillage 3D

III.5.1.6. Création du modèle tuilé

Le mode de mappage de texture détermine comment la texture de l'objet sera organisée dans l'atlas de texture. La sélection du mode de mappage de texture propre permet d'obtenir des organisations de texture optimales, et donc une meilleure qualité visuelle du modèle final.

L'outil de construction de la texture comporte de nombreux paramètres qui dépendent de la forme et de la nature de l'objet numérisé.

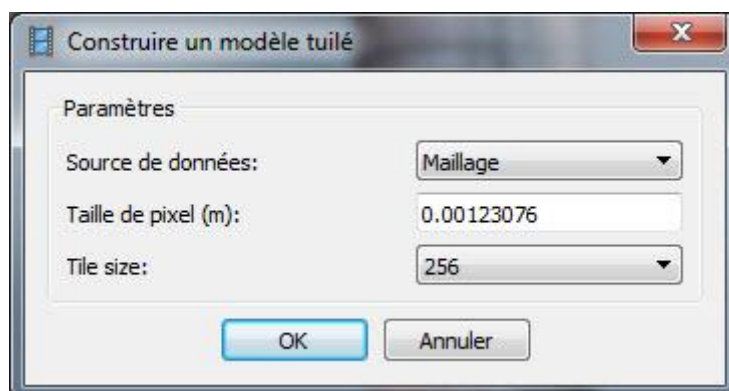


Figure 55 : Dialogue pour construire un modèle tuilé sous Agisoft



Figure 56 : Résultat de construction du modèle tuilé

III.5.1.7. L'extraction des résultats

Le modèle 3D créé sous Agisoft sera inspecté au niveau du logiciel 3DReshaper, dans ce contexte la plateforme photoScan nous permettrons l'exportation du modèle dans des différents formats suivantes : Wavefront OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, U3D....

III.5.2. Sous 3DReshaper

Cette partie est conçue pour réaliser les mesures de l'inspection sur le maillage (modèle 3D).

Les études d'auscultation sur 3DReshaper réalisées par des mesures sur les maillages, pour assurer un bon maillage, il a été nécessaire de vérifier et nettoyer le nuage de points avant de construire le maillage 3D.

III.5.2.1. Importation et mise en position du modèle

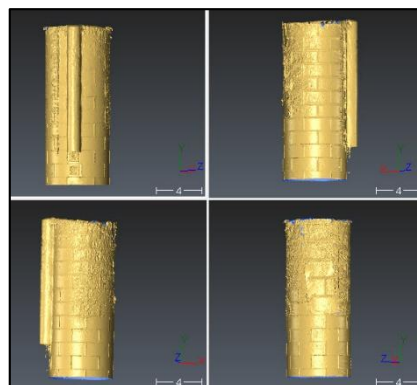


Figure 57 : les quatre faces du modèle sur 3DReshaper

On constate que le modèle présente des zones mal traitées pour les hauteurs plus de 5m dû aux contraintes de prise de vues (reflet des lumières ; forte inclinaison de caméra pour cibler les extrémités). Pour confirmer les résultats nous aurons inspectés la partie inférieure du silo de stockage correspond à 5m d'hauteur.

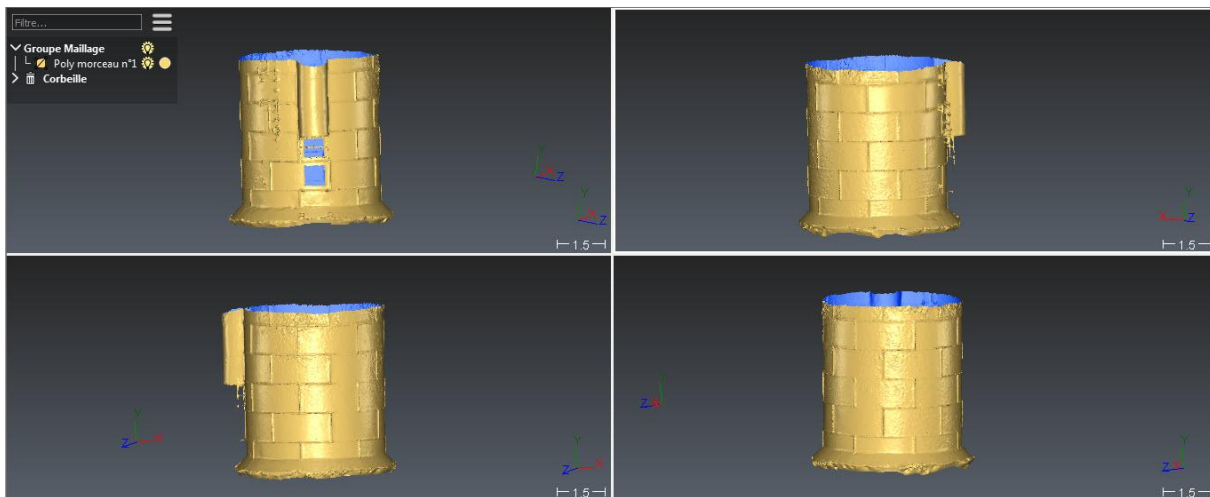


Figure 58 : Les quatre faces du modèle

La préparation d'inspection du modèle sur 3DReshaper commence par l'orientation de ce dernier de telle sorte que la normale sera colinéaire avec l'axe vertical (OZ).

III.5.2.2. Création de meilleur cylindre

Le lancement des traitements ce commence par la création de la meilleure forme cylindrique qui correspond au modèle théorique de l'objet (silo de stockage).

Définissez les points de référence, sont des points qui seront utilisés pour orienter les résultats ou corriger des valeurs d'altitude ou d'élévation.

Entrez la hauteur théorique du silo. Cette valeur est utilisée dans la commande Meilleur Cylindre pour définir la tolérance par défaut de l'aplomb.

Figure 59 : Dialogue d'extraction de meilleur cylindre

Cette méthode permet de calculer le meilleur cylindre correspondant à la robe du silo de stockage. Elle permet également de calculer l'aplomb du silo de stockage, tel que décrit dans la norme **API 650**.

Le choix du référentiel d'inspection est influencé par le code de construction, parmi ces codes on trouve :

EEMUA 159 : Entretien et inspection des réservoirs de stockage cylindriques verticaux en acier au-dessus du sol.

API 650 : Inspection, Réparation, altérations et reconstruction des réservoirs de stockage

CODRES division 2 : recommandations pour la maintenance des réservoirs de stockage cylindriques verticaux.

Remarque :

L'analyse des différents éléments d'un même réservoir doit être réalisée avec le même code de référence ;

Pour les réservoirs dont le code de construction est inconnu, on utilisera un des référentiels cités ci-dessus pour les opérations de maintenance. [DT 94, 2011]

L'extraction de meilleur cylindre peut générer, soit par une méthode automatique telle que la robe est automatiquement extraite du maillage et un meilleur cylindre est calculé à partir de cette robe, soit par une autre manuelle par la création d'un ou plusieurs points germes sur la robe pour initialiser l'extraction du meilleur cylindre. [HELP, AGISOFT 1.3]

Au niveau de ces deux méthodes vous pouvez éviter de calculer les points les plus loin ou les moins significatifs par l'ajout d'un simple pourcentage concernant les nombres des points espacés.

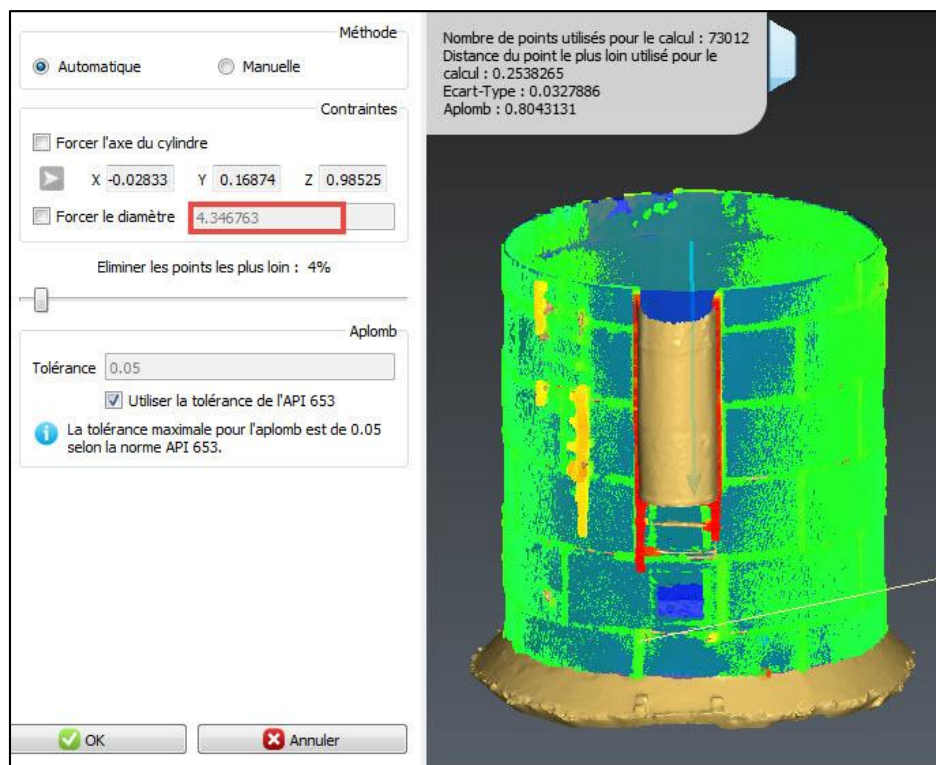


Figure 60 : Dialogue pour les paramètres d'extraction du meilleur cylindre

Le diamètre indiqué dans le capture d'écran précédent calculé automatique par le logiciel ($D_{calculé}=4.346m$)

Notre silo été constituée par des rangées de tôles rectangulaires superposées, appelées viroles, qui sont soudées bout à bout. Les joints verticaux de ces tôles sont généralement décalés horizontalement à chaque changement de virole par la moitié de leur longueur.

Sur terrain on a pris la mesure de la longueur de virole qui est 1.96m, tant que chaque niveau présenté par 7 pièces pour refermer le cylindre, donc le périmètre de notre silo égal à 13.72m.

$$D = \frac{Lc}{\pi} \quad ; \text{ Avec } Lc : \text{ le périmètre de cercle}$$

Par la suite les mesure de terrain nous donnons un diamètre égale à **4.367m**. ($D_{\text{mesuré}}=4.367\text{m}$)

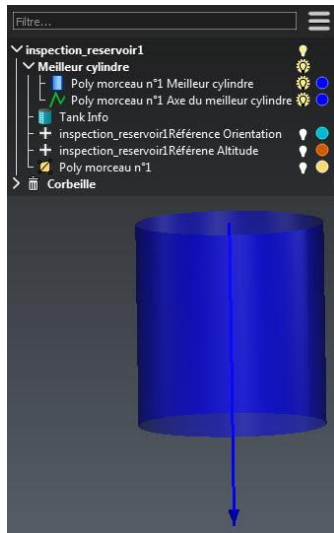


Figure 61 : Le résultat d'extraction du meilleur cylindre ; Figure 62 : Une virole du silo de stockage

III.5.2.3. L'inspection du silo de stockage

L'inspection se base sur des calculs montrant la différence entre les distances entre le maillage du silo de stockage et son meilleur cylindre (modèle théorique).

Ces mesures seront réalisées automatiquement à l'aide du logiciel 3DReshaper, nous pourrons ignorer les points trop éloignés en donnant une distance seuil.

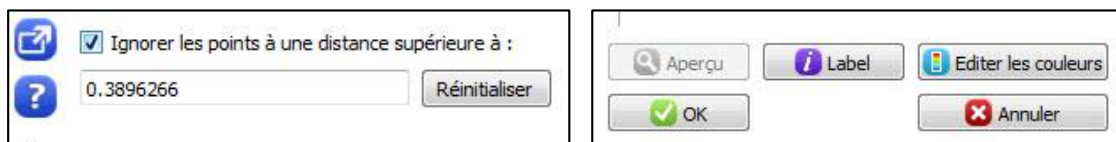


Figure 63 : Dialogue des paramètres de réglage du l'inspection

Ces options nous permettrons de requalifié les résultats obtenue par des intervalles bien déterminer, même il est possible d'ajouter des étiquettes pour indiquer la valeur de déviation d'un point bien déterminée, (distance entre le maillage et le modèle théorique).

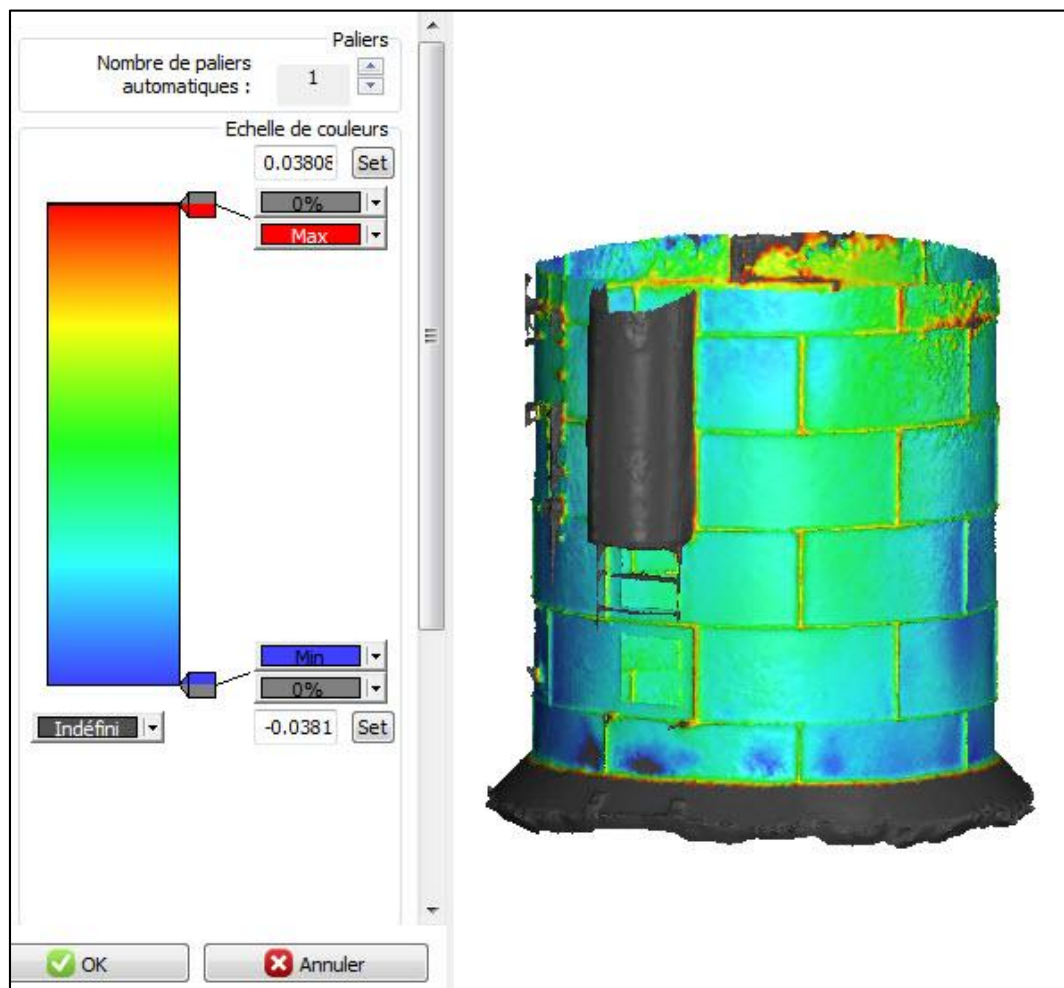


Figure 64 : Classification de résultat

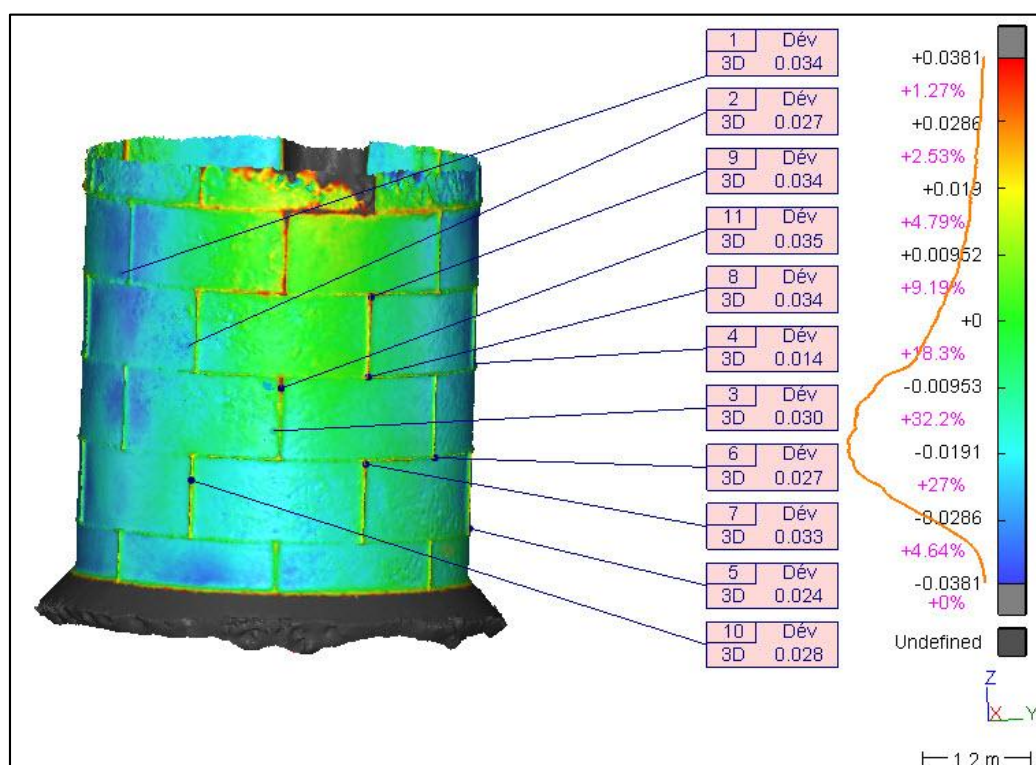


Figure 65 : le résultat d'inspection avec quelques étiquettes sur les bordures d'assemblage

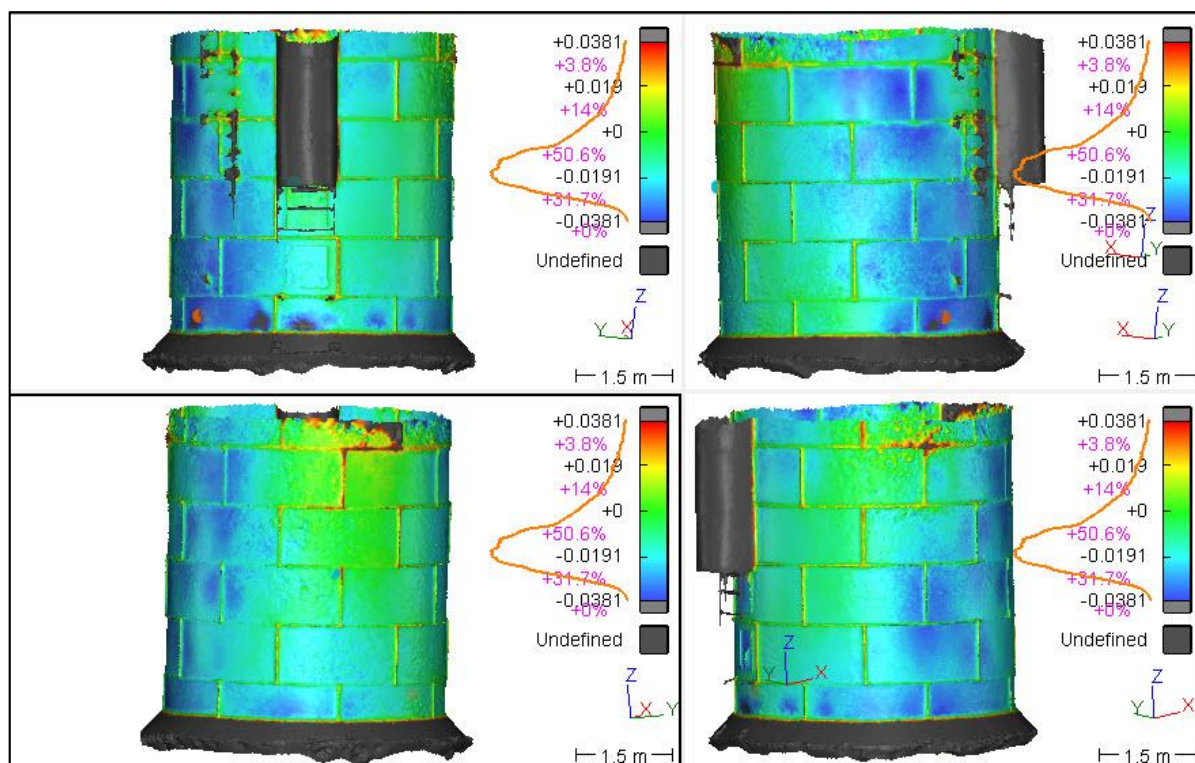


Figure 66 : le résultat d'inspection pour les quatre faces

Ce logiciel de modélisation 3D nous permet de cartographier les résultats d'inspection sur l'objet lui-même, pour une meilleure représentation qui sera aidé à la décision.

La représentation de résultat est sous la forme des six classes de couleur dans l'ordre croissant de bleu vers le rouge comme suite :

- ✚ [-0.038 ; -0.028] : Bleu
- ✚ [-0.028 ; -0.015] : Dégradation de bleu vers bleu ciel
- ✚ [-0.015 ; +0.01] : Dégradation de vert claire
- ✚ [+0.01 ; +0.02] : Dégradation de vert claire vers jaune
- ✚ [+0.02 ; +0.03] : Dégradation d'orangé vers le rouge
- ✚ [+0.03 ; +0.038] : Rouge

Au but de vérifier notre travail, on a prend quelque points sur la bordure d'assemblage du silo de stockage (modèle 3D), pour avoir comparé leurs dépassement par rapport au modèle théorique (meilleur cylindre).

La mesure de dépassement de la bordure d'assemblage sur terrain égale à **0.033m**, par contre au niveau de notre résultat (Figure.65) on a trouvé des valeurs proches de celle-ci, avec une moyenne de 0.030 m.



Figure 67 : Mesure de la bordure d'assemblage

Donc selon tous ces résultats et ces remarques on peut passer vers d'autres méthodes d'analyse comme la création des coupes horizontales et verticales sur le modèle.

III.5.2.4. Carte d'inspection

Le résultat d'inspection de silo de stockage peut être présenté en 2D par une projection réalisée par le logiciel 3DReshaper.

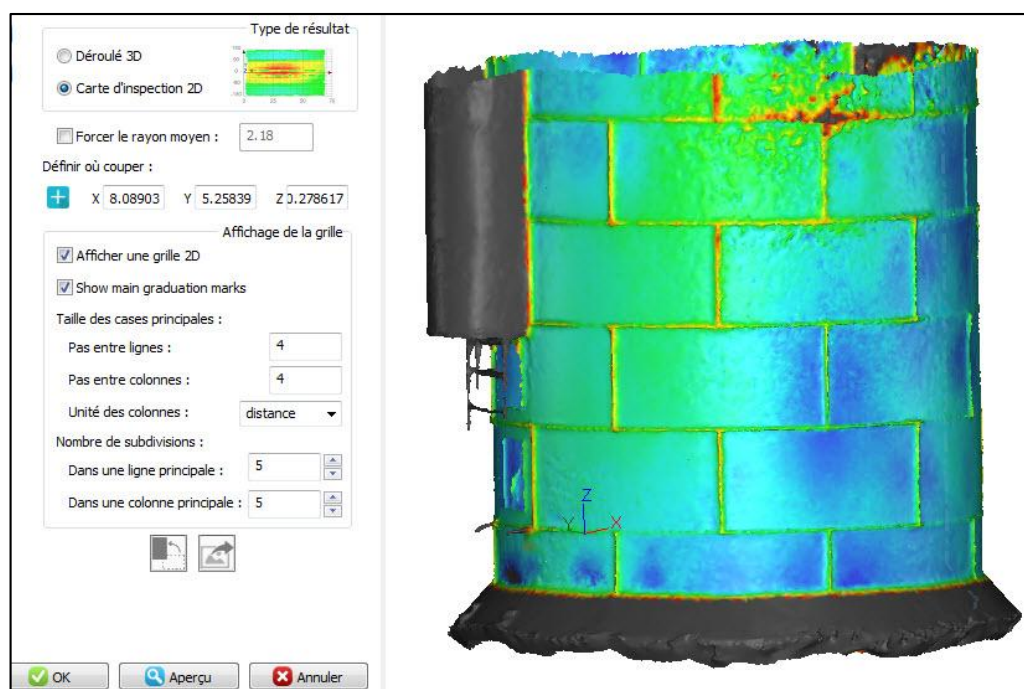


Figure 68 : dialogue de création d'une projection en 2D sous 3DReshaper

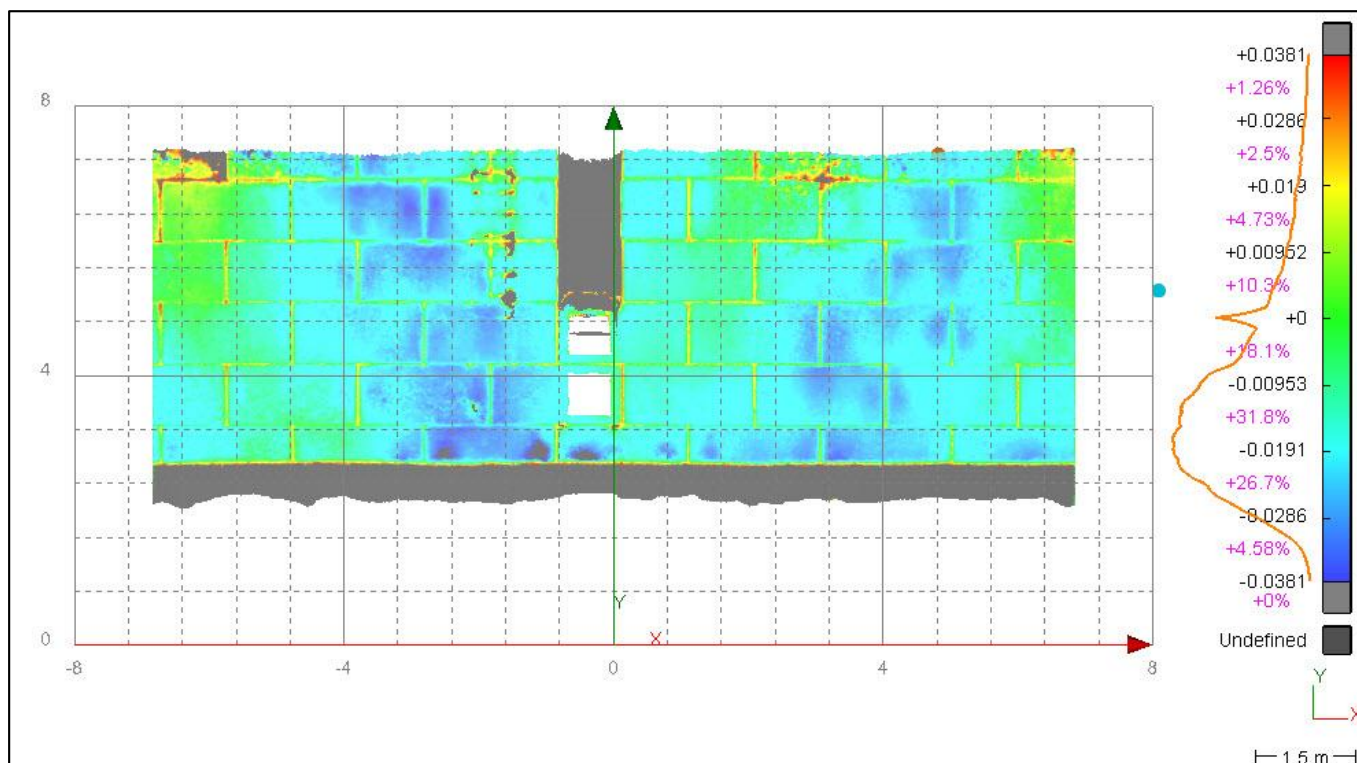


Figure 69 : Résultat d'inspection projeté en 2D

III.5.2.5. Les coupes horizontales

La circularité du modèle nous permet de créer des profils perpendiculaires à l'axe vertical (OZ) sur le meilleur cylindre et le maillage (modèle 3D) en même temps. Tel que les sections sur le meilleur cylindre sont considérées comme étant la référence et la section sur le maillage sont considérées comme la mesure. Les sections sur le maillage seront colorées selon leur dépassement calculé sur le modèle 3D de la réalité... on a créé une coupe chaque 1m.

Les différents paramètres de cette application présentée dans ce dialogue :

Direction

- ☒ Perpendiculaire à l'axe du meilleur cylindre
- ☐ Perpendiculaire à l'axe Z (sections horizontales)

Tolérance du rayon

+/- 0.0381

☒ Utiliser la tolérance de l'API 653

La tolérance maximale de rayon est de 0.0381 pour un rayon mesuré supérieur à un pied au dessus du bas de la robe selon l'API 653.

Localisation des sections

- ☒ Avec un pas régulier 1
- ☒ Partout
- ☐ De 0 à 1
- ☐ Donner une liste de hauteurs
- ☐ Cliquer des points

Aperçu 2D 3D

☐ En ligne

☐ En colonne

☐ En grille

☒ Afficher une vue 3D

Figure 70 : Dialogue de paramétrage pour le sectionnement

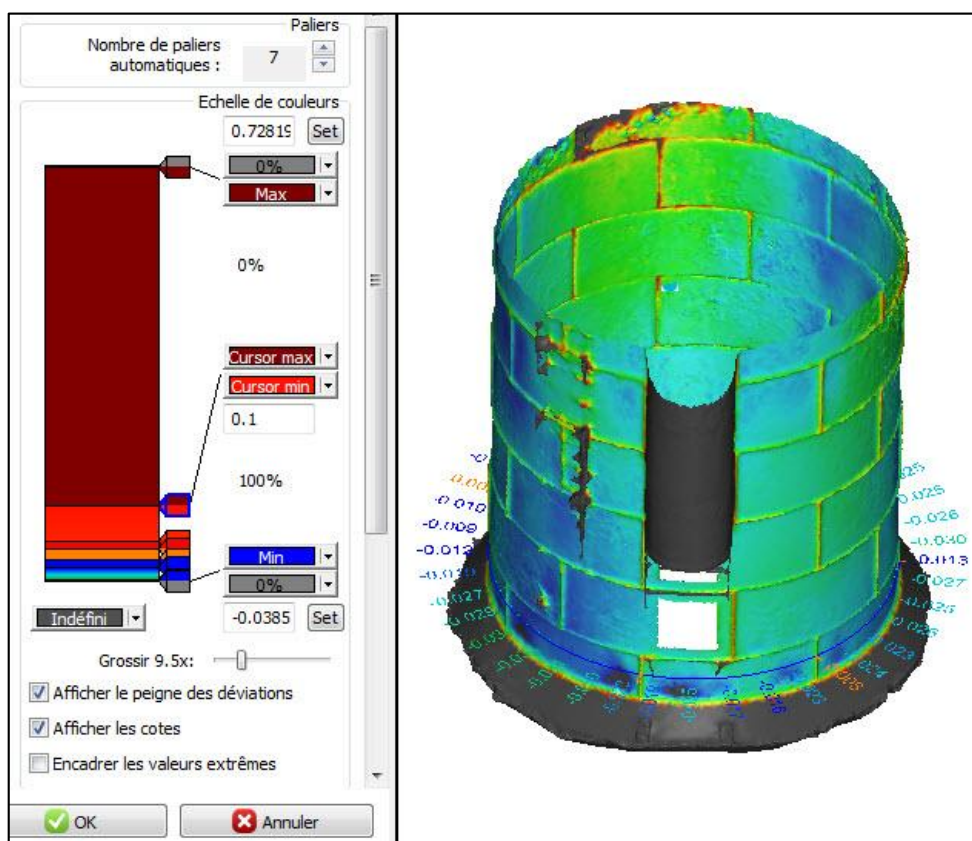


Figure 71 : Classification pour coupes circulaires

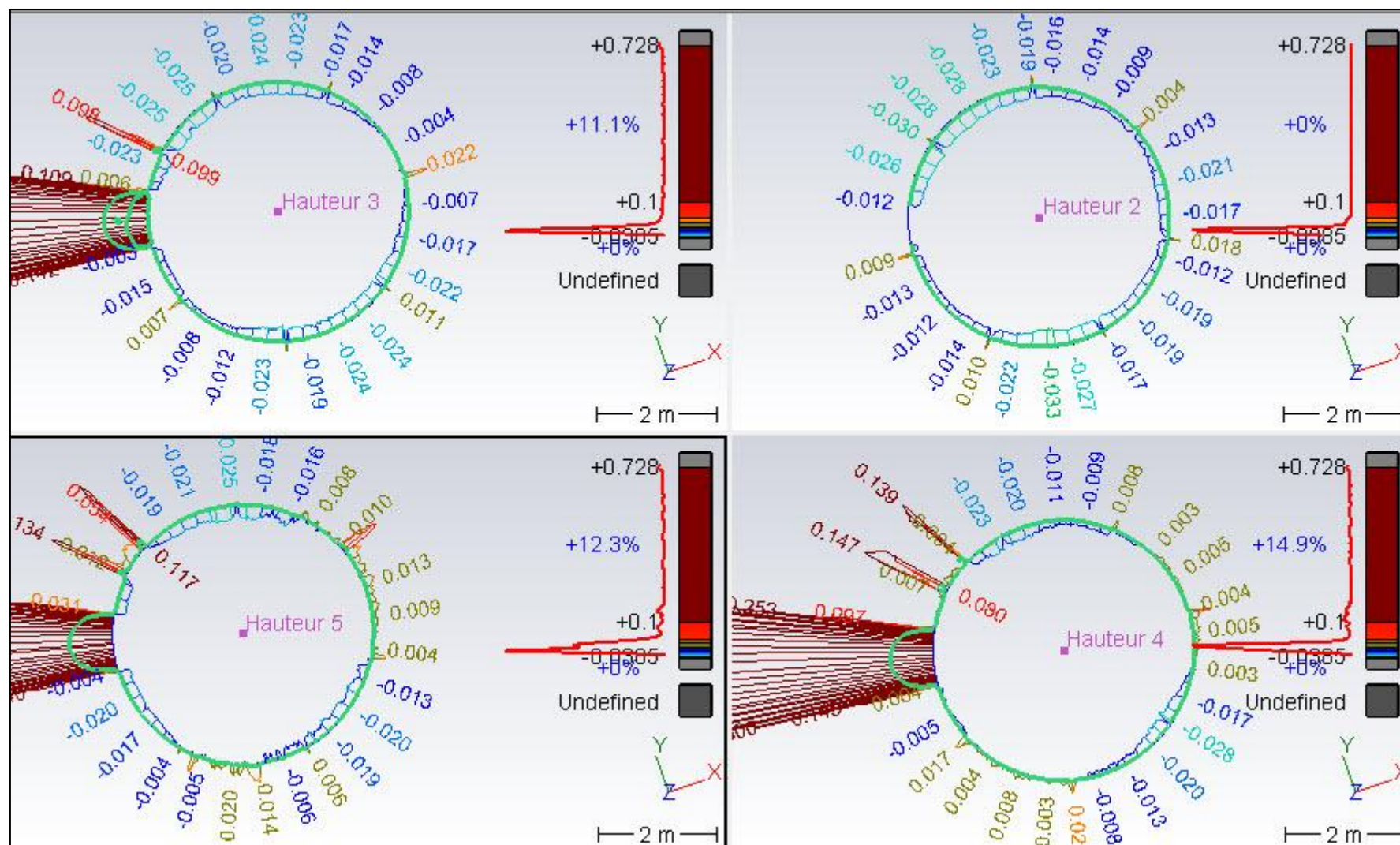


Figure 72 : Résultat des coupes circulaires à chaque 1m d'hauteur

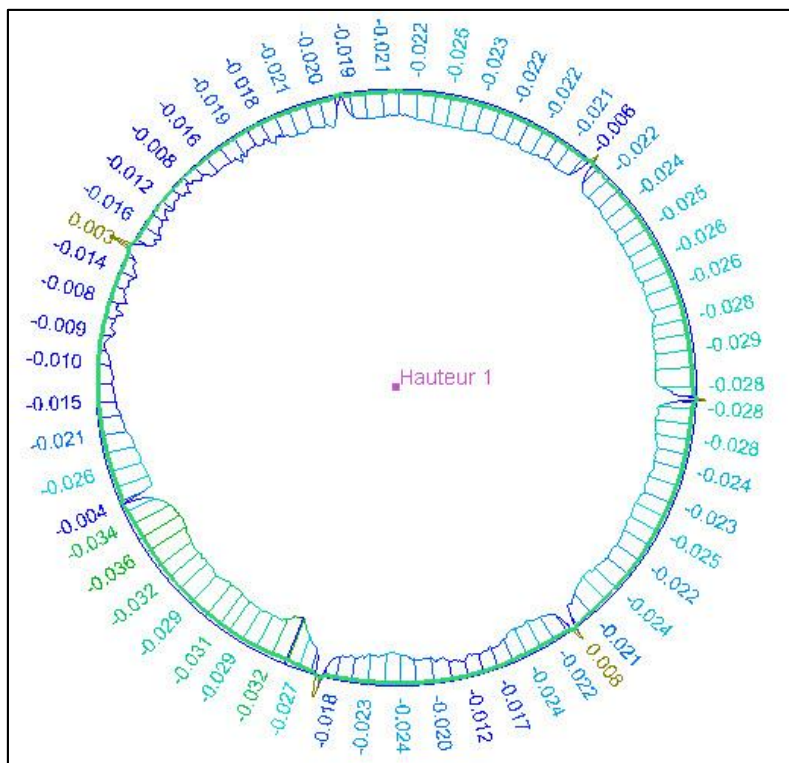


Figure 73 : Coupe horizontale à 1m

Sur la circonférence de la première coupe horizontale qui est situé à 1m de hauteur, on a trouvé que le corps du silo de stockage a été reculer par rapport au cylindre théorique, par une moyenne de -2 cm, sauf 7 parties sous forme des pics qui sont correspond de la bordure d'assemblage.

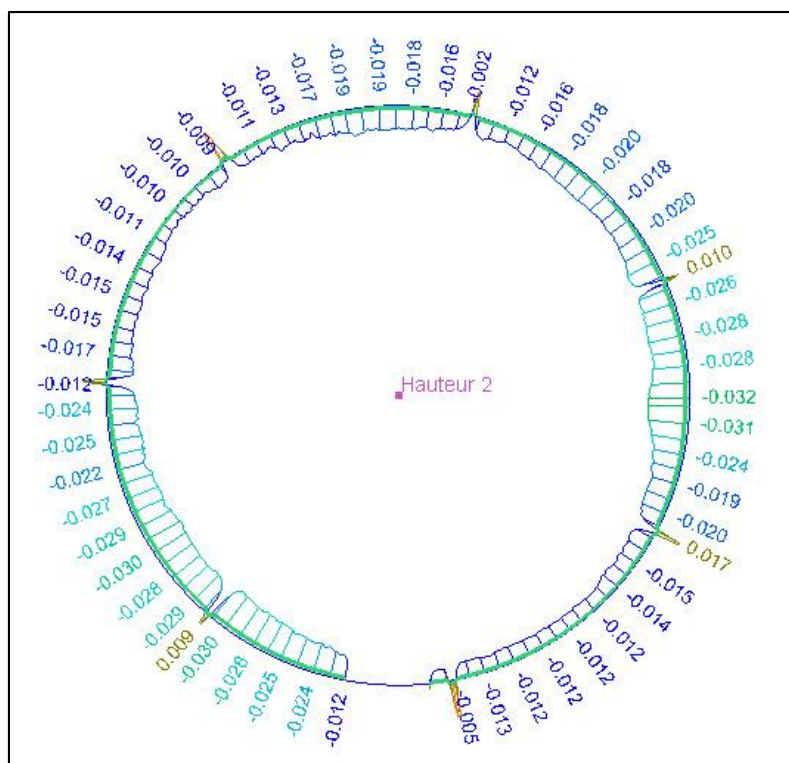


Figure 74 : Coupe horizontale à 2m

Au niveau d'une hauteur de deux mètres on observe presque les mêmes déformations avec une diminution légère pour les zones qu'ils aient reculées par rapport au cylindre théorique.

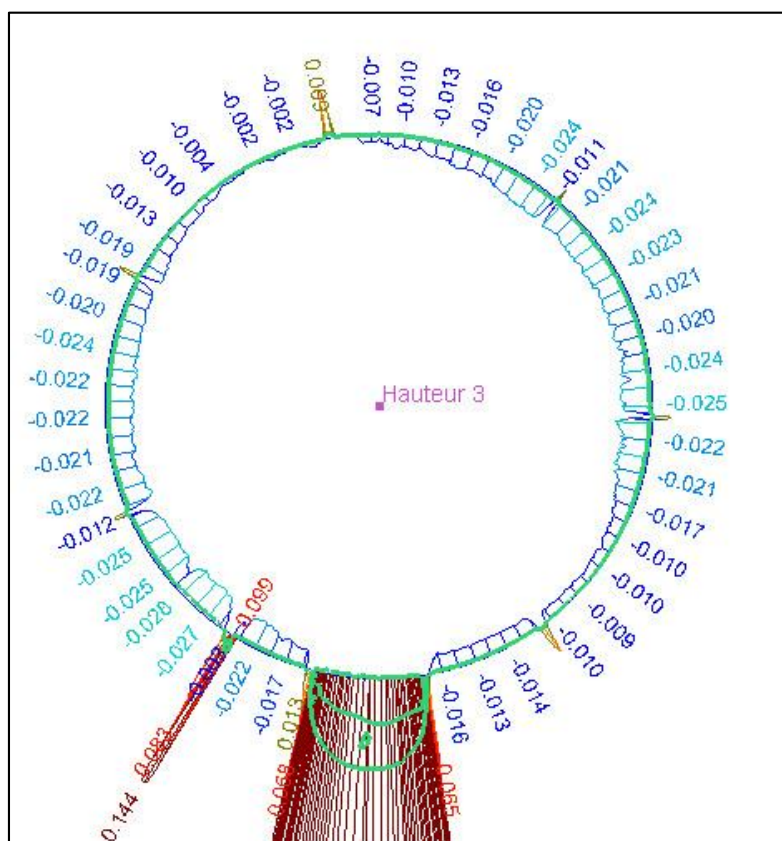


Figure 75 : Coupe horizontale à 3m

La troisième coupe présente encore des valeurs négatives (parties reculées), avec des nouveaux pics qu'ils sont correspond au corps superflu de notre silo de stockage (comme l'escalier et leur couvercle)

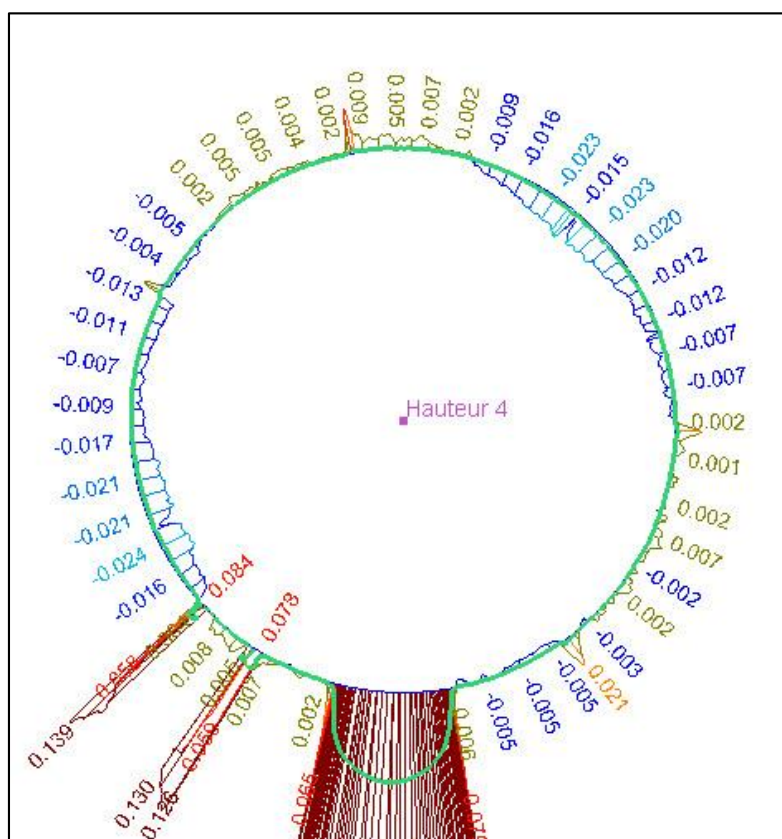


Figure 76 : Coupe horizontale à 4m

Quatrième niveau Ayant les mêmes remarques que la dernière coupe, avec une apparence de dépassement légère à une moyenne de 5 mm du silo de stockage par rapport au cylindre théorique.

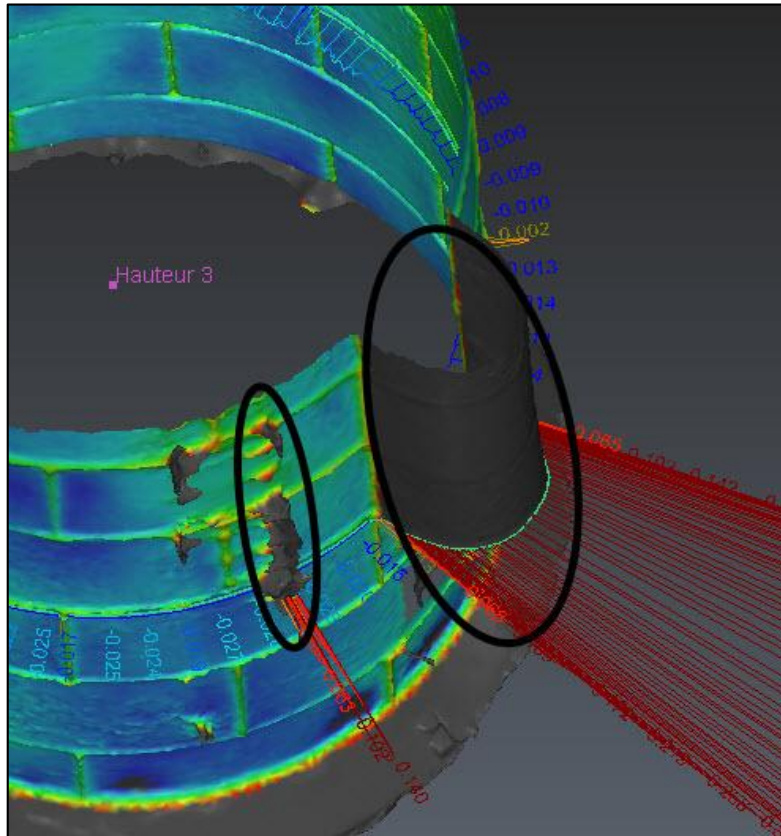


Figure 77 : Les corps superflu de notre silo de stockage

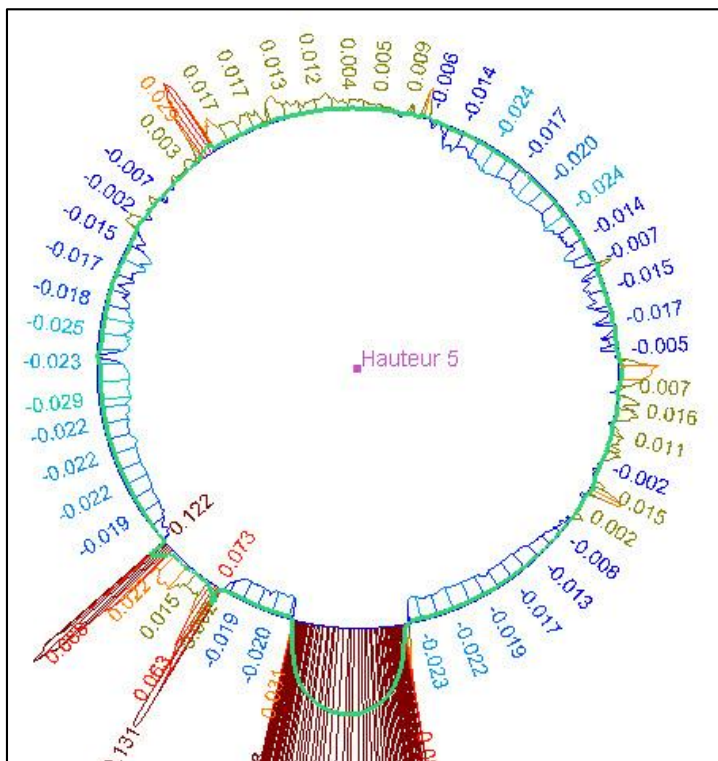


Figure 78 : Coupe horizontale à 5m

Le dernier coupe présente une évolution de la quatrième coupe, on a remarqué une diminution des valeurs négatives jusqu'à 1cm.

Aussi on a trouvé une croissance de valeur des parties de dépassement jusqu'à 1cm.

Interprétation :

Les coupes horizontales présentent des déformations plus ou moins acceptable par rapport au niveau d'inspection (3m de hauteur) sur le corps de notre silo de stockage, toutes les valeurs fortes liées aux pièces supplémentaires de notre silo.

Mais pour détailler et vérifier les déformations légères, nous serons passé pour la création des profils verticaux.

III.5.2.6. Les coupes verticales

On passe pour la création des profils parallèles avec l'axe vertical (OZ) sur le meilleur cylindre et le maillage 3D en même temps. Ce sont des profils qui coupent l'objet verticalement sur la totalité de la circonférence du cylindre de notre silo de stockage avec un angle constante entre deux profils successifs(30°) , pour avoir une comparaison entre la section sur le meilleur cylindre (modèle théorique) et la section sur le maillage 3D.

Quand vous définissez un angle, les sections seront appliquées sur la totalité du maillage, de telle sorte que la vérification de la verticalité sera basée sur les deux sections opposées (par exemple le 0° avec le 180°)...

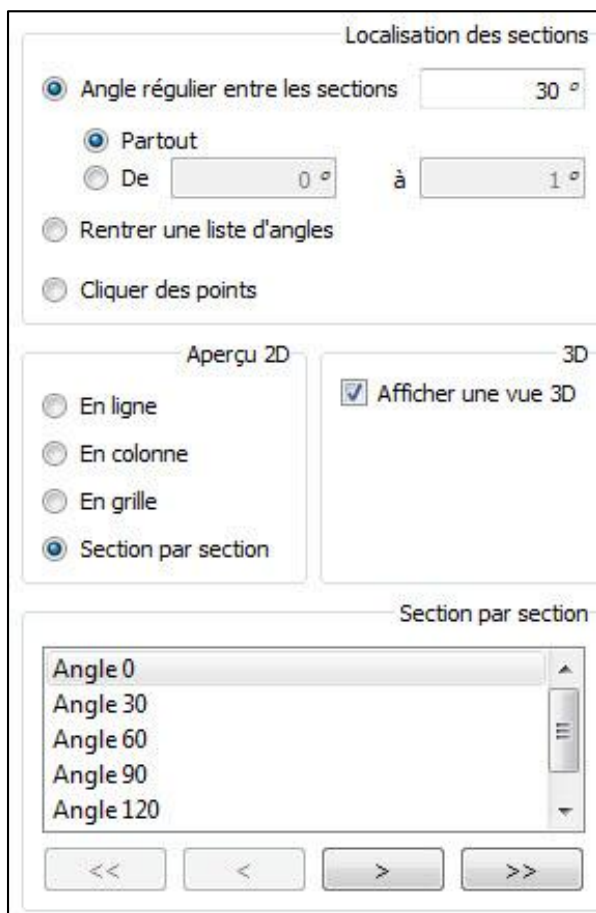


Figure 79 : Dialogue de paramétrage

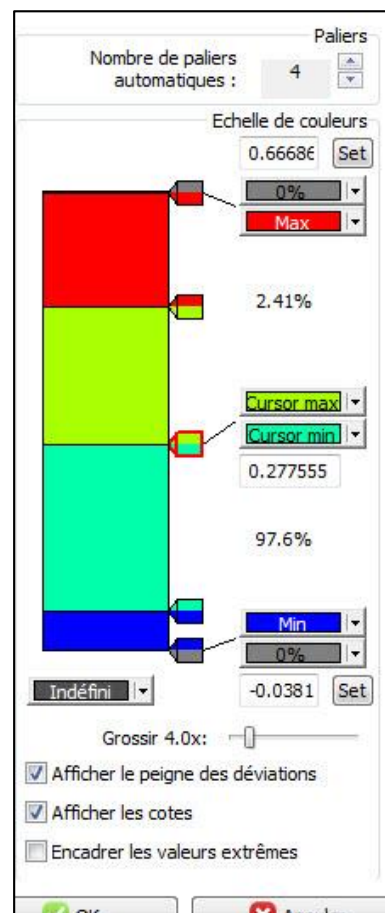


Figure 80 : Paramètres de classification

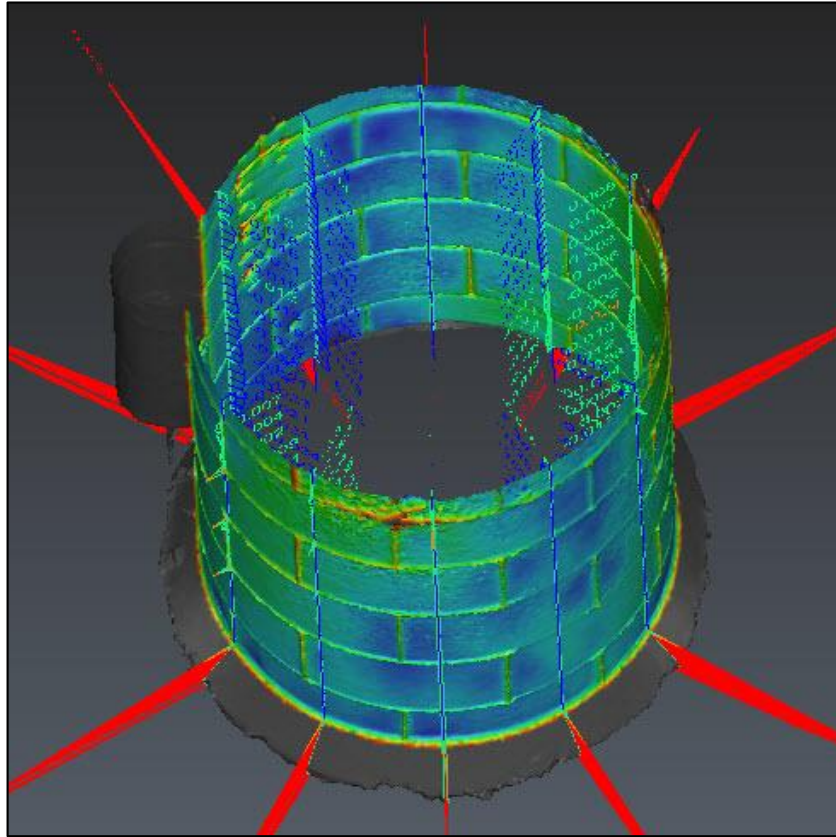


Figure 81 : Résultat d'inspection de la verticalité

On observe que le profil de la section 0° touche les corps superflu (couverture de l'escalier), pour éviter ces résultats on a supprimé ce dernier. De même on a évité de prendre en considération la base de silo dans les sections verticales, car il était classé parmi les objets superflus (construite en ciment).

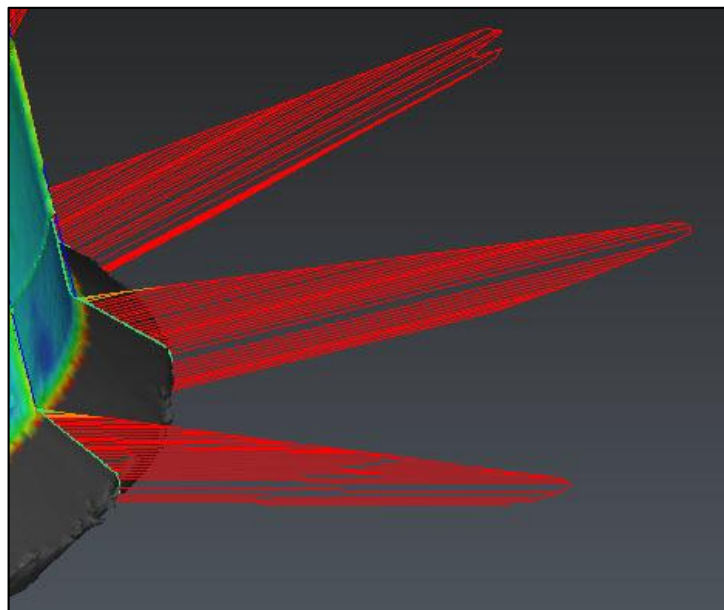


Figure 82 : La base de silo sui est en ciment

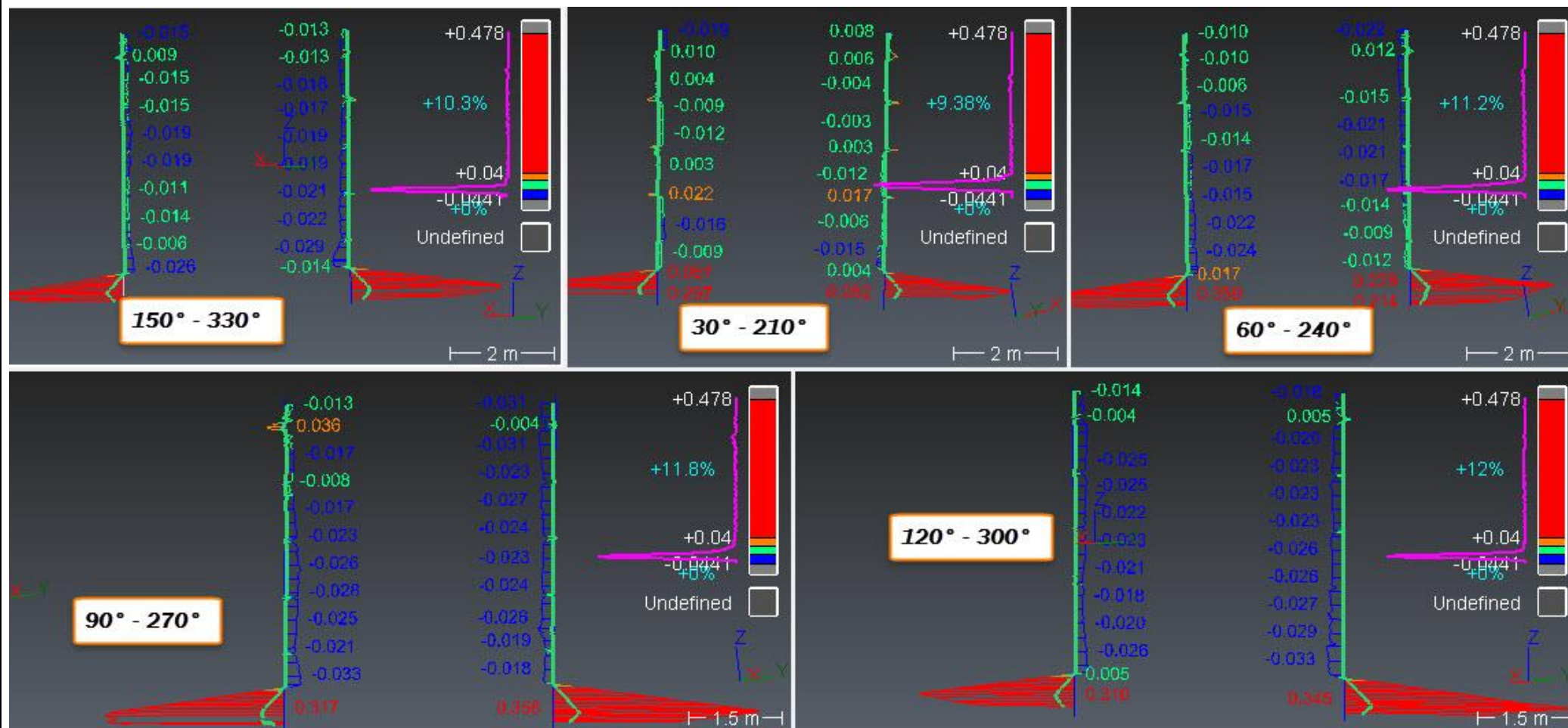


Figure 83 : Le résultat d'inspection de la verticalité pour chaque coupe

On remarque que les pics dus à la bordure d'assemblage sont moins visibles.

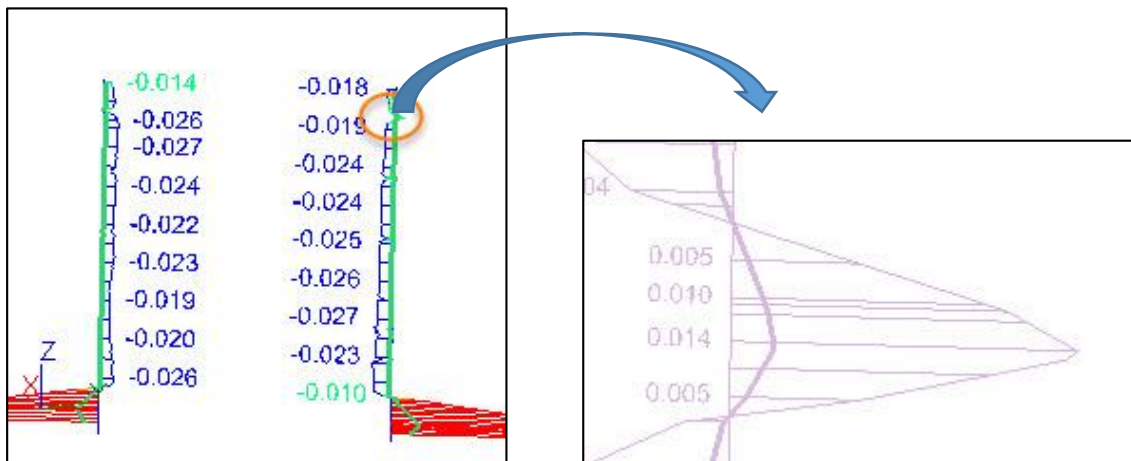


Figure 84 : Vérification des pics sur une section verticale

L'interprétation :

L'analyse sur les profils verticaux par deux angles opposés a confirmé le bon état de la verticalité de l'objet.

Lorsqu'on observe les valeurs de déformation pour chaque deux coupes opposée, on peut généraliser que les valeurs sont les mêmes en fonction d'hauteur, or le problème de la verticalité sera existé Lorsqu'on trouve des valeurs à des signes opposés.

Donc ces observations nous orientent de conclure que ces déformations négatives dues à l'erreur de la détermination de rayon du cylindre.

III.6. Conclusion

Avant de passé au résultat d'inspection du silo de stockage, on a vérifié notre modèle 3D d'une première fois par l'équivalence de rayon calculé avec le rayon mesuré (sur terrain), cette vérification nous donne une différence de (-2cm) de la réalité.

en outre une vérification sur le résultat d'inspection par la comparaison de la distance de dépassement de la bordure d'assemblage mesuré sur terrain et la distance calculer par le logiciel, cette opération donne des bonnes résultats (Figure.65).

Par suite l'inspection de notre silo de stockage présente des déformations fine pour les valeurs positives (gonflement ou dépassement) qu'ils ont variés à quelque millimètres sauf les pics de les bordures d'assemblages qu'ils sont déjà à une distance de 33cm par rapport la robe du cylindre.

Même on a trouvé d'autres déformations présentes des valeurs négatives entre 1.5 cm et 2.5 cm, avec les profils horizontales et verticales sur l'objet on constate que ces déformation (à valeurs négatives) dues à l'erreur de calcul de diamètre de cylindre.

Généralement notre silo de stockage elle est en bonne santé géométrique, on n'a pas trouvé des déformations qu'ils peuvent être créés des problèmes.

3^{ème} Partie : Calcul volume

III.1. Introduction

Grâce à nos connaissances photogrammétriques pour les prises de vues terrestre, nous avons orienté nos recherches pour les calculs des volumes (Stocks). On a déjà expliqué ce type d'application au niveau de la premier chapitre, dans le titre “La photogrammétrie et leurs application topographique”.

Cette étude basée sur les modèles volumétriques issue de la restitution photogrammétrique, au but de déterminé les volumes des stocks dans les carriers. Il faut faire des tests expérimentaux pour avoir la tolérance d'erreur obtenue par la méthode photogrammétrique.

En même temps on a va voir la méthode topographique classique pour les calculs volumétriques et le comparer avec le résultat photogrammétrique.

III.2. Test expérimental

Cette expérience au but d'établir une démarche à suivre et de définir certaines conditions d'utilisation en vue d'augmenter la fiabilité dans les tests ultérieurs. Cela devrait également permettre de diminuer les erreurs possibles, que ce soit lors de la prise de vues ou du traitement.

Le plus important de cette partie, c'est d'avoir une première idée sur la précision des résultats de restitution photogrammétrique dans ce contexte.

On a choisi de réaliser ce test expérimental sur un cône de sable, car on peut déterminer son volume facilement par des mesures géométriques.

III.2.1. La mesure de volume manuellement

Le calcule de volume manuellement il est possible par ces deux formules :

$$\Rightarrow v = \frac{m}{\rho}$$

Formule.6

$$\Rightarrow v = \frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times h$$

Formule.7

Pour la première, il est difficile de détermine la masse volumique exact car il est liée à plusieurs facteurs (sa demande des préparations au niveau de laboratoire...), donc j'ai appliqué la deuxième formule dans ce test.



Figure 85 : L'échenillant de l'expérience (le volume à calculer)

Pour déterminer le rayon de cône de sable et sa hauteur, on a utilisé des astuces simples comme suite :

La hauteur a été déterminée avec une tige métallique du sommet vers la base du cône, puis marqué la limite avec le sable et faire une simple mesure. **$h = 19.5\text{cm} = 0.195\text{m}$**



Figure 86 : Mesure d'hauteur du cône de sable

Le diamètre a été mesuré sur trois axes par le principe de Pied à coulisse.

Le diamètre du premier axe : $42\text{cm} = 0.42\text{m}$

Le diamètre du deuxième axe : $42.5\text{cm} = 0.425\text{m}$

Le diamètre du troisième axe : $41.3\text{cm} = 0.413\text{m}$

Le diamètre moyenne égale à : **$D = 0.419\text{m}$; $R = 0.21\text{m}$**



Figure 87 : Mesure du diamètre du cône de sable

L'application numérique :

$$v = \frac{1}{3} \times \pi \times 0.21^2 \times 0.195 \rightarrow \boxed{V = 0.009\text{m}^3}$$

III.2.2. Traitement sur logiciels

Après une prise de vue circulaire sur notre cône de sable, on a transféré les photos sur Agisoft pour créer le nuage des points et le maillage 3D.



Figure 88 : Résultat nuage des points



Figure 89 : Résultat maillage 3D

La mise à l'échelle du modèle 3D se fait à l'aide des deux planche en bois, il faut introduire leurs longueurs réelles sur le logiciel Agisoft pour assurer calage de modèle.

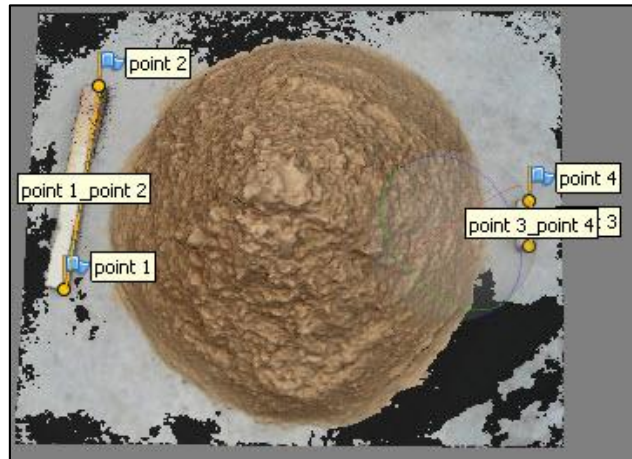


Figure 90 : Mise à l'échelle de l'objet

Par suite ce modèle 3D doit être transféré sur le logiciel 3DReshaper pour passer au calcul de volume.

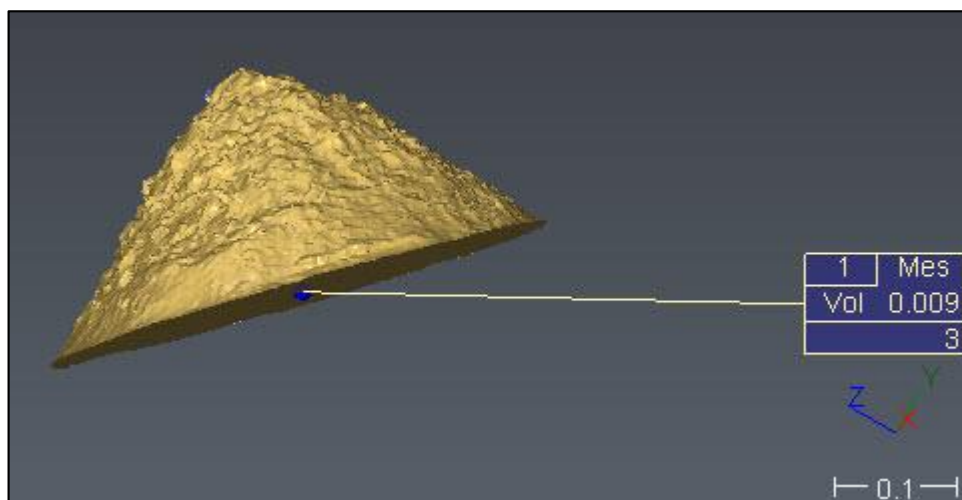


Figure 91 : Résultat de calcul volume

III.2.3. Conclusion

Le volume calculé et le volume obtenu par les traitements photogrammétriques sont les mêmes. On constate que la méthode photogrammétrique est très précise.

III.3. Localisation de zone d'étude

L'application de cette étude est appliquée au niveau de carrière SOMATP qui est située à proximité de Grombalia (9 km), il est desservi par une route revêtue qui donne l'accès à l'autoroute A1 (Tunis à 35 km) et à la GP1 (Tunis-Cap Bon). Les formations exploitées appartiennent au Crétacé Supérieur (Campaniens, niveau Abiod, de 65 à 80 millions d'années).

La carrière SOMATP (ouverte en 1996), elle fournit le sable concassé 0/4, le gravillon 2/6,3 et le gravillon 6,3/16... Ces coupures sont produites à l'aide de deux concasseurs à percussion. Après abattage, le tout-venant est passé dans le premier concasseur pour donner après criblage le sable primaire. Le refus est ensuite passé dans le second concasseur pour donner des gravillons et un sable secondaire. [ACHOUR .T, 2007]

Cette zone est localisée approximativement dans les coordonnées géographiques à $36^{\circ}31'57.96''\text{N}$ de latitude et $10^{\circ}26'59.26''\text{E}$ de longitude

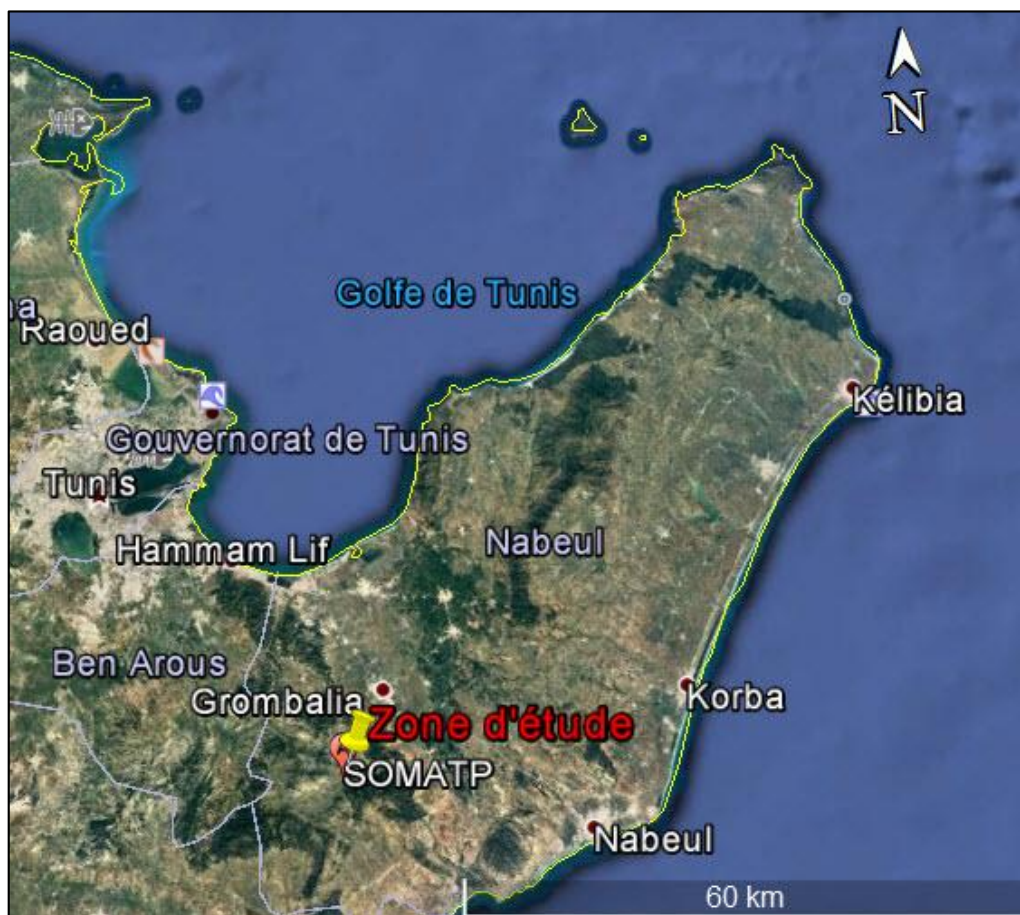


Figure 92 : Localisation de la zone d'étude (Carrière SOMATP)

III.4. Préparation de prise de vue

III.4.1. Reconnaissance de terrain

On a organisé avec une équipe topographique une visite de reconnaissance au niveau de la plateforme de stockage de carrière SOMATP, les stocks sous différentes taille, on trouve des stocks avec des tailles moyennes, qu'ils sont accessibles pour une prise de vue terrestre.

Au niveau de stock il n'y a pas des objets remarquables pour les prendre comme référence le jour de la prise de vie.

Par observation le diamètre approximatif du stock est de 5m.

III.4.2. Préparation bureau

III.4.2.1. Préparation du matériel

Il faut régler les paramètres de caméra (Samsung ES60) pour assurer une meilleure qualité de prise de vue, cette étape ce sera fini quand cela s'applique les paramètres qui sont indiqué au niveau du tableau N°3.

III.4.2.2. Préparation du plan de mission

La mission de prise de vues est planifié par notre extension-Autocad PLM6.6, pour optimiser le nombre des photos et assurer le meilleur recouvrement de l'objet par la détermination de ces paramètres :

- La distance d'éloignement souhaité.
- Le nombre des photos pour chaque bande.
- Les axes des photos.
- Le nombre des bandes.
- Base stéréoscopique (distance entre deux photos successives).

Il suffit d'ajouter quelques caractéristiques du camera utilisée comme la distance focale, la taille de l'image au niveau de la camera... L'extension PLM6.6 va calculer les paramètres indispensables et préparer un modèle de prise de vues occupé par un tableau contient les paramètres déjà calculés.

III.4.2.3. Les résultats

- La distance d'éloignement souhaité environ 5.11 m.
- Nombre des bandes égalent à 2.
- Les axes sont fixés à 12 dans toutes les conditions, ce sui assuré 30° entre deux axes successifs.
- La base stéréoscopique terrain 2.62 m.

1er Méthode | 2ème Méthode | Chevauchement et dessin | Object circulaire

Calcul de distance d'éloignement

Données

Distance focale (mm)

Dimensions de l'image (mm) Longuer Largeur

Diamètre de scène (m)

Hauteur d'objet

Recouvrement fixe

Double recouvrement = 66%

Triple recouvrement = 33%

Résultat

Distance d'éloignement (m) Calculer

dessiner

Résultat

Calculer

Taille de l'image sur terrain (m) Nombre des bandes Base stéréoscopique (m)

Figure 93 : Résultat théorique de la mission de prise de vue

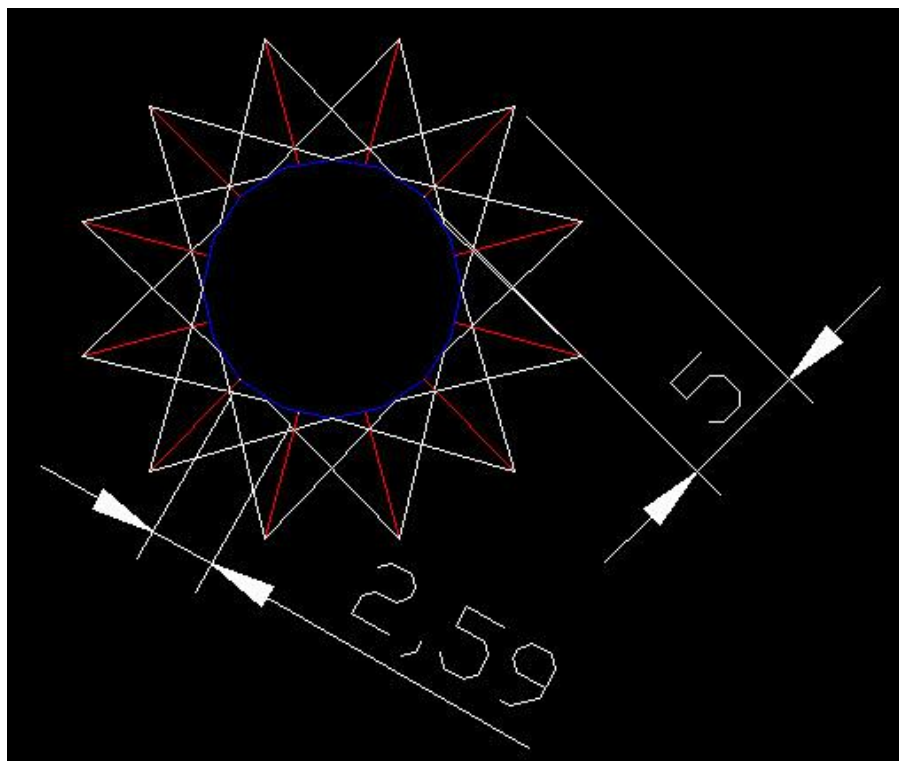


Figure 94 : Résultat graphique du modèle de prise de vues (objet circulaire)

III.5. Matériels utilisés

- + Une caméra numérique Samsung ES60 : modèle compact numérique de 12,2 Mégapixels. Il dispose d'un zoom optique de 3x et d'une ouverture de F3.2-5.8 (Focale).



- + Canne porte prisme.



- + mètre rouleau magnétique



- + GPS GeoMax Zenith 25



III.6. Mission d'acquisition des photos

Le jour de terrain on a utilisé un mètre à rouleau magnétique et une caméra numérique (Samsung ES60), à une distance environ 5m, on a pris des séries de photos selon des axes presque horizontaux autour de notre objet (stock 0/3).

Lors de la prise de vues on a photographiée une canne pour assurer la mise à l'échelle de la scène dans les traitements.

Pour assurer un bon recouvrement on doit respecter la distance de base stéréoscopique pour chaque prise de vues.

Les problèmes de prise de vue :

- ❖ Sur éclairage (reflet de la lumière du soleil).
- ❖ Le couleur uniforme de stock et le terrain

Cette mission finie par l'acquisition de 45photos, avant de quitter le terrain il faut vérifier la qualité des photos.

III.7. Traitement des données (photographies)

III.7.1. Sous Agisoft

III.7.1.1. Calibrage de camera

La calibration de caméra présente comme premier traitement appliqué sur les photos au niveau du logiciel Agisoft, il se fit d'introduire le fichier d'étalonnage qui est préparé sous Agisoft Lens (voir le titre : Etalonnage de l'appareil photo).

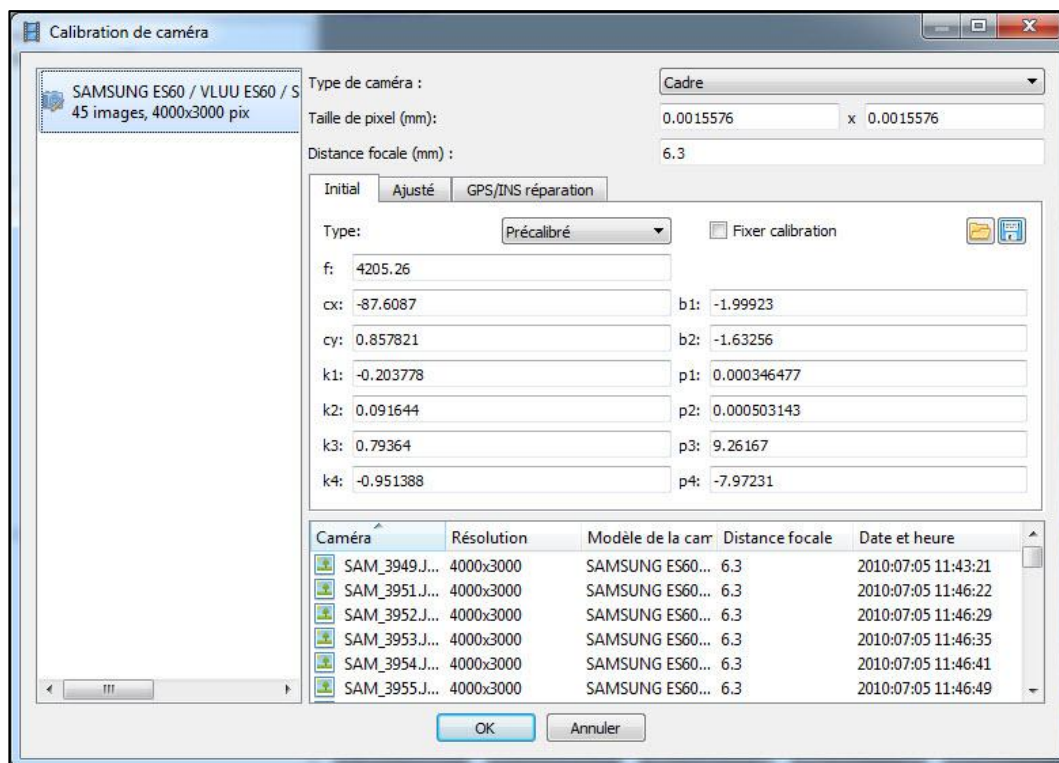


Figure 95 : Calibrage de camera sous Agisoft

III.7.1.2. Alignement des photos

À ce stade, Agisoft trouve la position de caméra et l'orientation de chaque photo, et construire un modèle en nuage de points clairsemé. L'alignement ayant été achevé, les positions de caméra calculées et un nuage de points clairsemé seront affichés. Vous pouvez inspecter le résultat de l'alignement et supprimer les photos mal positionnées. [HELP, AGISOFT 1.3]

Le logiciel Agisoft faire des calculs de positionnement des caméras lors de la prise de vue, ce qui présente les opérations d'orientation.

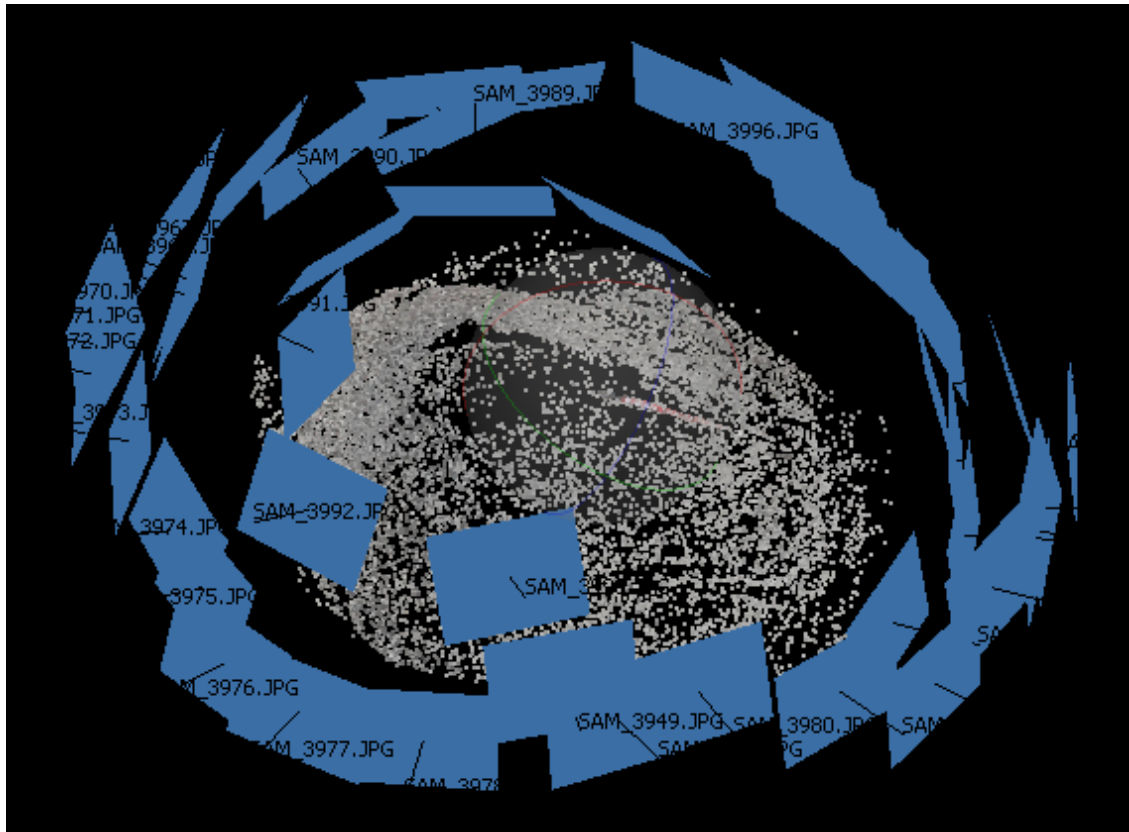


Figure 96 : Calibrage et mise en position des camera sous Agisoft

III.7.1.3. Création de nuage dense



Figure 97 : Résultat de construction d'un nuage dense sous Agisoft

III.7.1.4. Mise à l'échelle

On peut néanmoins s'en servir pour vérifier la distance entre deux points connus et connaître ainsi la marge d'erreur. Les outils suivants peuvent également servir à prendre quelques mesures sur le nuage de points. On a implanté quelques points au niveau du nuage puis on a défini les distances réelles entre eux.

Repères	X (m)	Y (m)	Z (m)	Précisi
☐ point 2				
☐ point 3				
☐ point 4				
Erreur totale				
Points de con...				
Points de véri...				
III				
Barres d'échelle	Distance (m)	Précision (m)	Erreur (m)	
☒ point 2_...	1.250000	0.001000	-0.000186	
☒ point 3_...	0.223000	0.001000	0.001043	
Erreur totale				
Barres d'éche...			0.000749	
Barres d'éche...				

Figure 98 : Liste point repère et barre d'échelle sous Agisoft

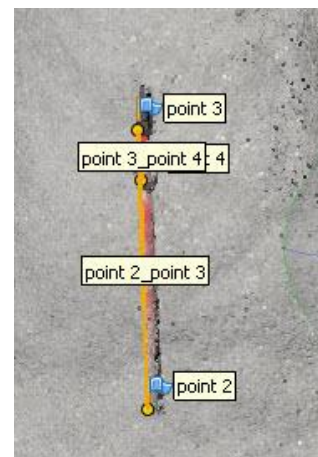


Figure 99 : Point repère implanté sur un nuage dense sous Agisoft

III.7.1.5. Création de maillage 3D

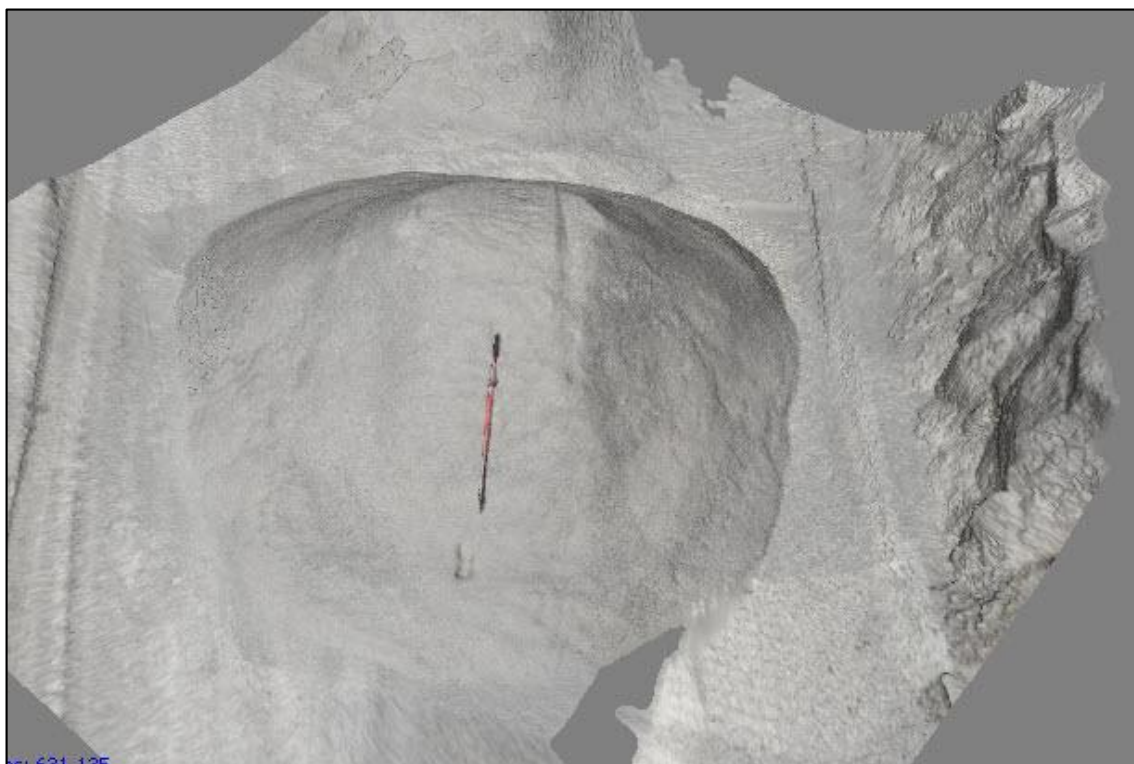


Figure 100 : Résultat de construction du maillage 3D.

Après la création du modèle 3D sous Agisoft, ce dernier doit être exporté vers le logiciel 3DReshaper sous le format (*.obj), afin de calculer le volume cette option qui n'est pas disponible sous Agisoft.

III.7.2. Sous 3DReshaper

Au niveau de logiciel 3DReshaper on doit découper le stock selon leurs limites avec le sol puis on va calculer son volume.

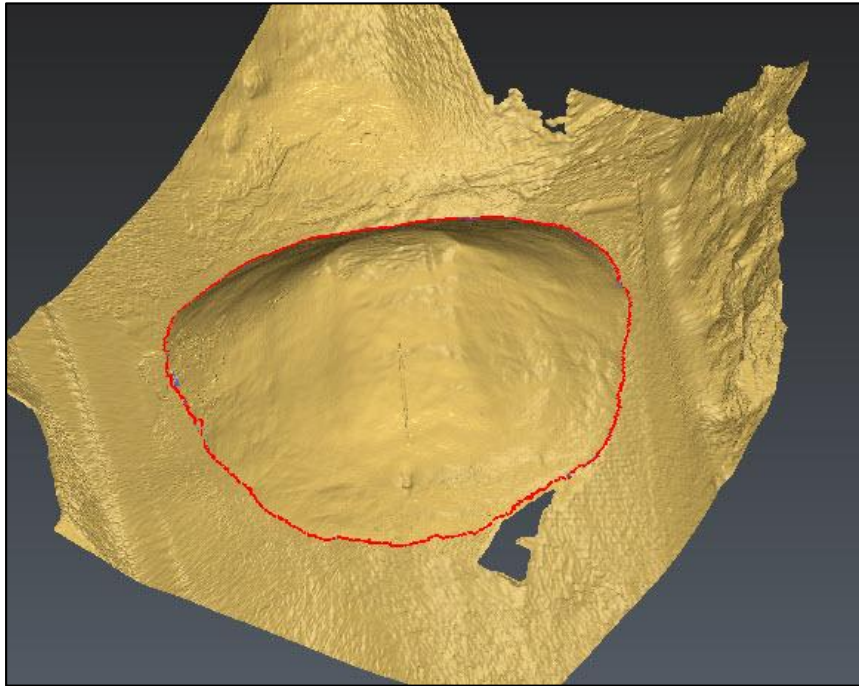


Figure 101 : Création de la ligne de coupure sur le modèle 3D

Puis on fait une extraction de modèle sur cette limite pour avoir calculer son volume.

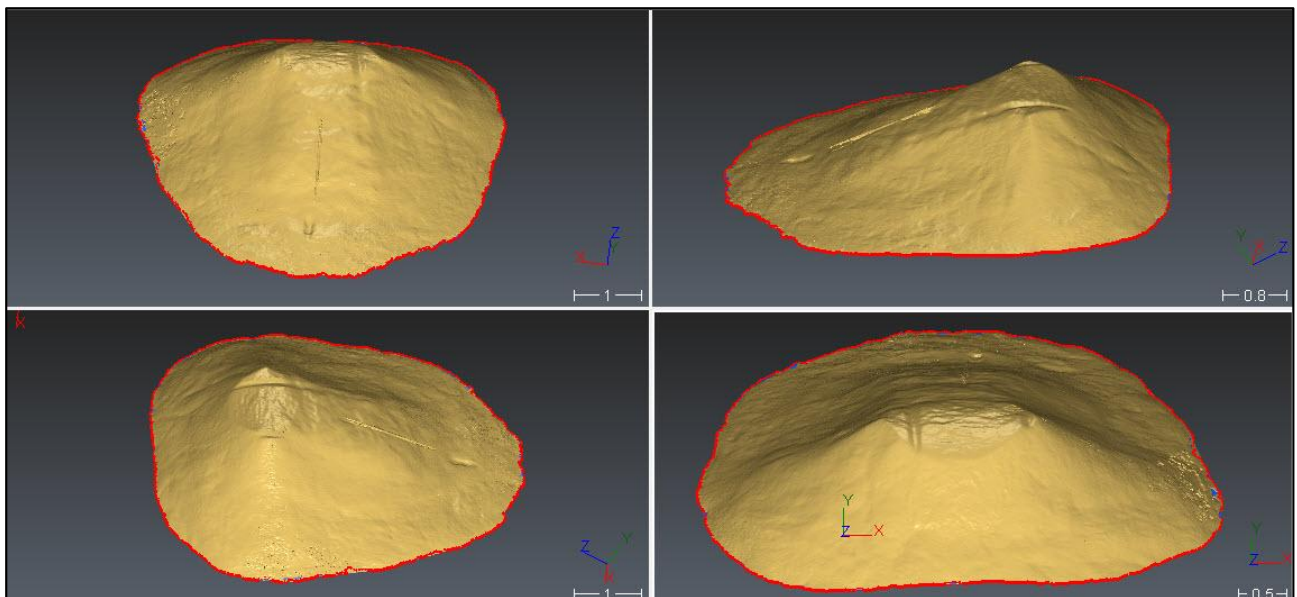


Figure 102 : Extraction du modèle de stock

Le calcul de volume sur ce logiciel se fait par le remplissage de modèle d'une première pas, et l'interpolation par triangulation sur la base du modèle en deuxième pas.

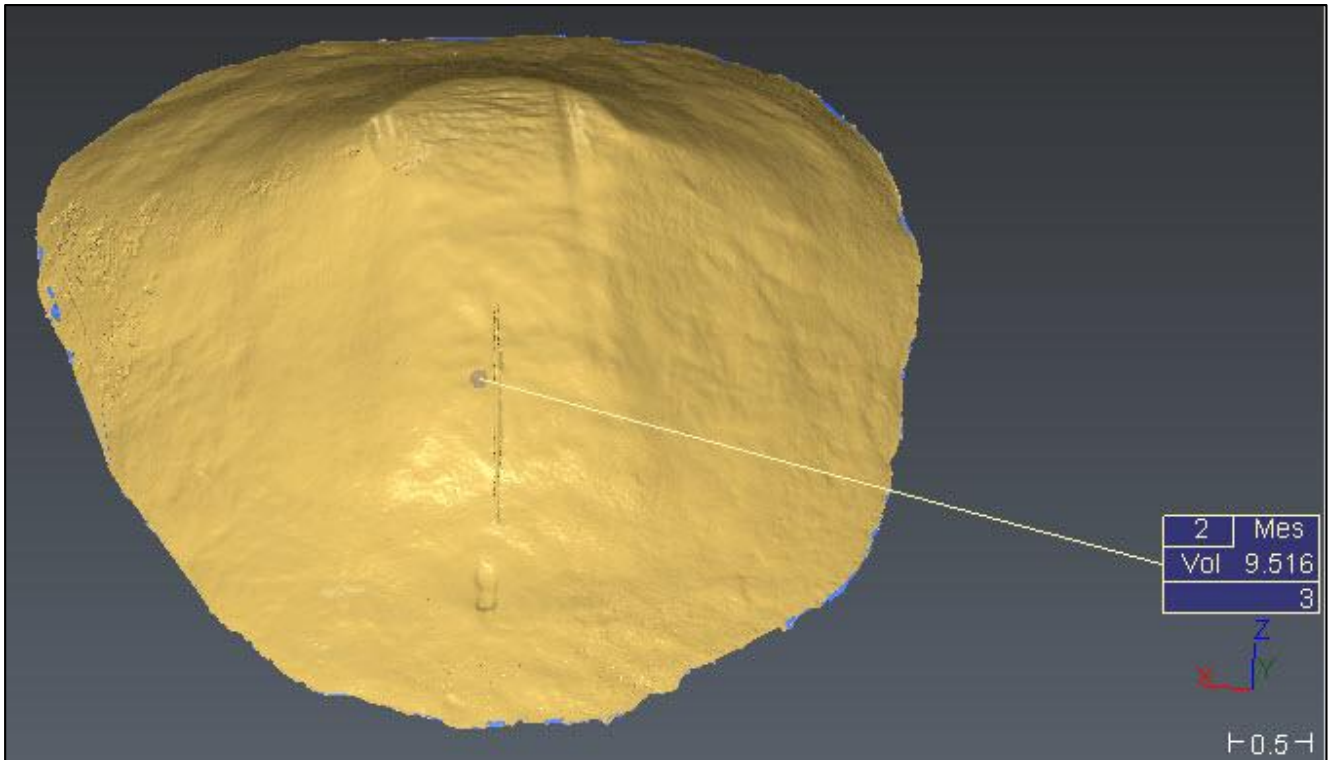


Figure 103 : Résultat de volume calculé sur le modèle

Cette technique a été confirmée d'après le test expérimental, mais pour comparer et vérifier le calcul de volume de ce stock on a référé à la méthode topographique (levé topographique).

III.8. Calcul volumétrique par la méthode topographique

III.8.1. Levé topographique

Toujours les mesures géométriques demandent l'intervention de topographe. Pour calculer le volume des stocks, d'une première part le topographe prennent leur levé topographique par station totale ou GPS... Dans notre cas le levé topographique se fait par un GPS en mode NRTK.



Figure 104 : Mission de levé topographique (GPS)

139	548357.795	360043.037	282.805	CP	DL DCTI
140	548359.091	360043.541	282.815	CP	
141	548359.698	360044.674	282.972	CP	
142	548360.102	360046.280	283.120	CP	
143	548359.742	360047.742	283.190	CP	
144	548358.524	360048.406	283.238	CP	
145	548357.162	360048.300	283.275	CP	
146	548355.699	360047.977	283.335	CP	
147	548355.027	360046.576	283.192	CP	
148	548355.246	360045.212	283.036	CP	
149	548355.844	360043.894	282.901	CP	
150	548356.935	360043.254	282.875	CP	
151	548358.633	360043.193	282.830	CP	
152	548357.025	360046.825	284.161	CP	DL DCTI
153	548357.557	360046.253	284.089	CP	
154	548358.207	360046.454	284.102	CP	
155	548358.354	360046.853	284.137	CP	
156	548357.843	360047.140	284.076	CP	
157	548357.334	360046.978	284.118	CP	
158	548357.806	360046.553	284.138	C	
159	548356.074	360046.981	283.678	C	
160	548357.527	360047.887	283.654	C	
161	548359.421	360045.950	283.525	C	
162	548357.536	360044.489	283.389	C	
163	548357.527	360045.532	283.929	C	

Figure 105 : Résultat levé par GPS

III.8.1.1. Mode d'utilisation de GPS

Lorsqu'on travaille avec le mode RTK, la partie mobile doit être calculée la ligne de base (la distance entre le mobile et la station de référence du réseau ou du pivot RTK), et recevoir les mêmes corrections qu'ils permettent de limiter le maximum d'influence des erreurs spatialement corrélées.

Avec le mode NRTK, les corrections sont issues d'un calcul de réseau basé sur une interpolation des erreurs géométriques (éphémérides et troposphère) et dispersives (ionosphère) à partir des erreurs effectivement mesurées sur un ensemble de stations entourant le mobile.

L'office tunisien de topographie et du cadastre a établi un réseau GNSS couvrant le territoire tunisien. Ce réseau GNSS composé par 23 stations permanentes couvrant le nord, centre et une partie de sud tunisien.

Les coordonnées sont calculées quotidiennement sur les stations connectées au réseau IGS (ANKR, EBRE, GRAS, MATE, RABT et SFER). Ces calculs ont permis d'obtenir les coordonnées précises de ces vingt-trois stations. [OTC, 2013]

Les problèmes rencontrés lors le levé des stocks par GPS :

- ✚ la canne était descendue de 2cm pour chaque point à cause de la rigidité faible du stock, cette descende va atténuer les altitudes des points qui va influencer sur les résultats de calcul du volume.

III.8.2. Création des modèles numériques de terrain

Ces coordonnées seront importées sur le logiciel DAO (Autocad) par les extensions de Covadis 10.1 pour générer les MNT de stock. Cette méthode basée sur la déférence entre deux MNT pour avoir le volume de stock.

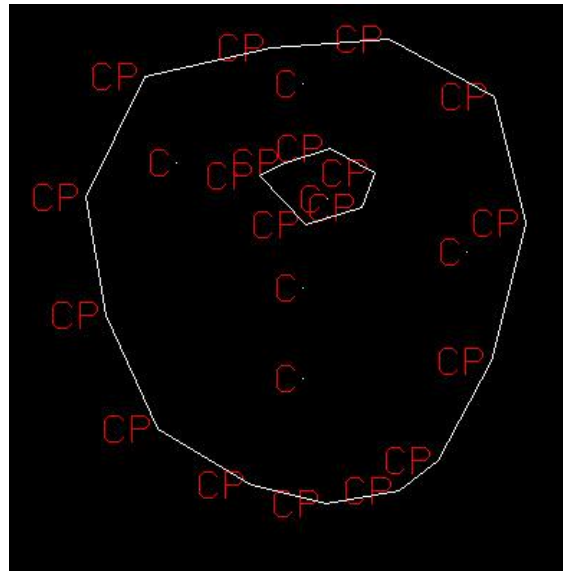


Figure 106 : Importation des coordonnées levées sur Autocad

Dans une première étape on a calculé le MNT de la plateforme autour et au-dessous du stock, puis on a calculé le MNT du stock.

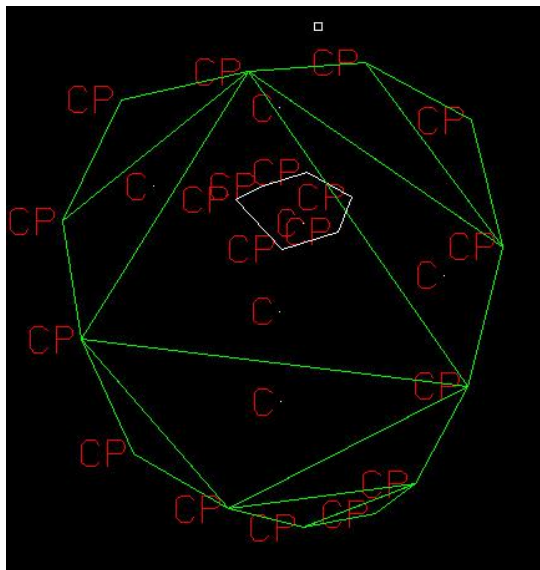


Figure 107 : MNT1

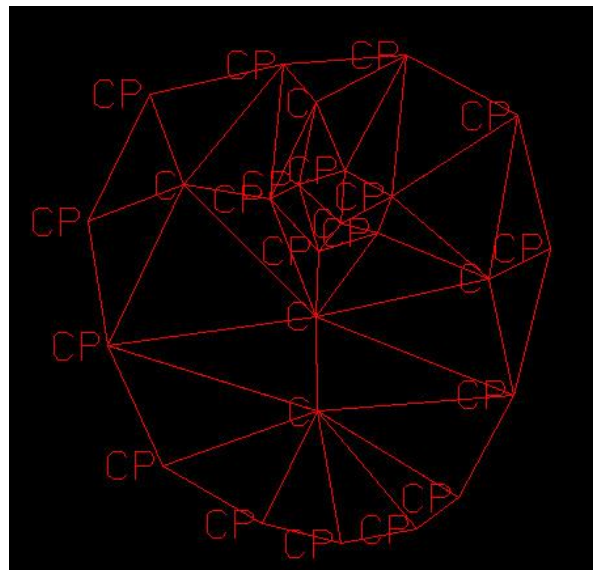


Figure 108 : MNT2

Résultats du calcul de cubatures MNT1 → MNT2			
Surfaces 2D			
Avec déblai	0.00	m²	
Avec remblai	21.06	m²	
Sans écart	0.00	m²	
Total	21.06	m²	
Surfaces 3D			
Avec déblai	0.00	m²	
Avec remblai	21.15	m²	
Sans écart	0.00	m²	
Total	21.15	m²	
Volumes			
Déblai	0.000	m³	
Remblai	8.032	m³	
Total	8.032	m³	

Figure 109 : Résultat volume de stock par méthode topographique

Interprétation :

La différence de volume de ce stock entre les deux méthodes presque $1,5\text{m}^3$, la méthode photogrammétrique donne un volume plus grand par rapport au volume calculé par topographie, la différence de volume touche 15%.

Remarque :

Ce différence de volume dû au :

- + La ligne de coupure de stock avec la plateforme n'est pas le même pour les deux méthodes.
- + La densité des points dans la 2^{ème} méthode.

III.9. Optimisation d'erreur de calcul volume

Cet essai pour confirmer la comparaison de calcul volume entre la méthode topographique et la méthode photogrammétrique.

On a remplacé la ligne de coupure de modèle 3D par la ligne de coupure issue du levé topographique, est par la suite l'interpolation de la base du modèle (MNT_1 du modèle 3D), doit être confrontée avec le modèle numérique de terrain issu de levé topographique (MNT_1 du levé topographique).

En outre la comparaison de volume sera faite au niveau du deuxième modèle numérique de terrain de deux méthodes (MNT_2 du levé topographique contre la forme de maillage 3D).

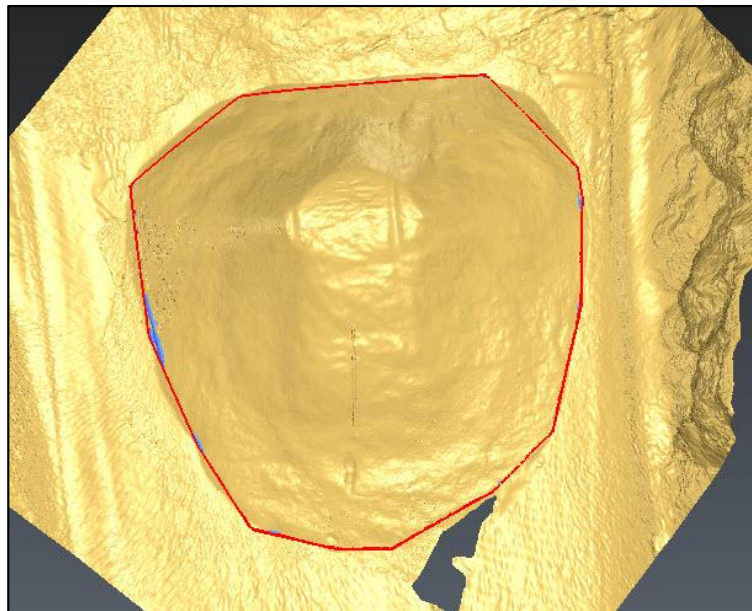


Figure 110 : Superposition de la ligne de coupure du levé avec le modèle 3D

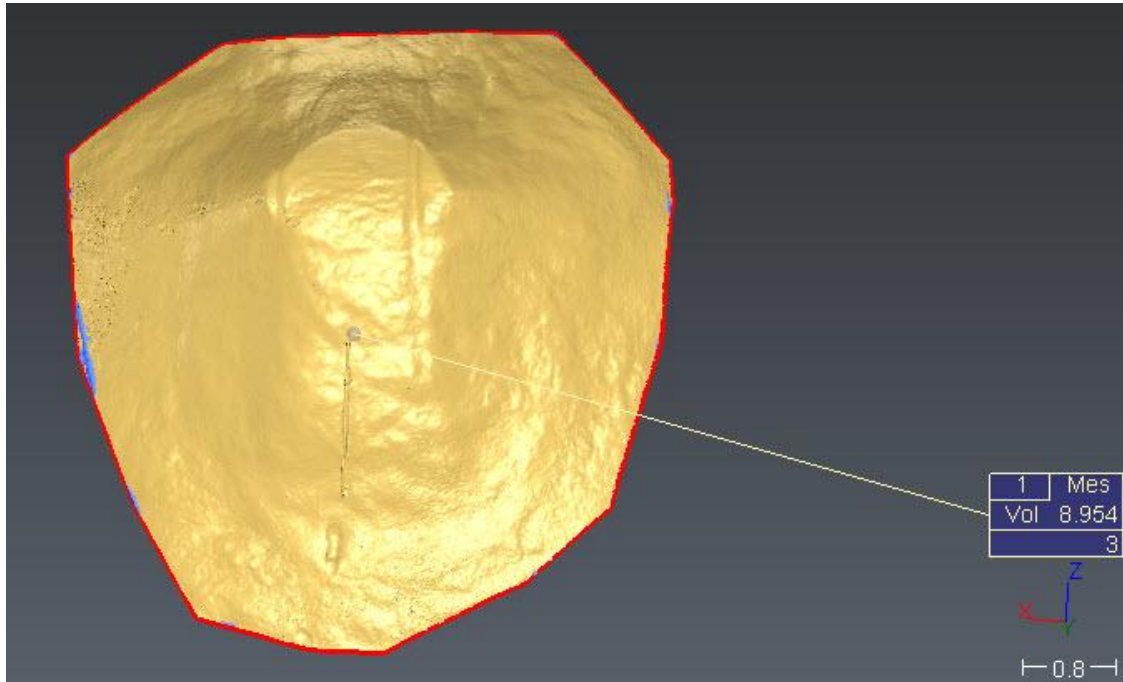


Figure 111 : Résultat de calcul du volume

III.9.1. Interprétation

La différence de volume de ce stock entre les deux méthodes environ 1m^3 , la méthode photogrammétrique donne un volume plus grand par rapport au volume calculé par topographie, la différence de volume touche le 10%.

III.10. Conclusion

Le calcul des volumes par la méthode photogrammétrique a assuré un bon résultat d'après le test expérimental.

La forte précision de calcul lié à la densité des points, qu'ont été construits (la distance entre 2 point $< 1\text{mm}$), et ensuite le modèle de terrain créé est très proche de la réalité, par contre par la méthode topographique on ne peut pas atteindre cette densité (à cause de temps).

Conclusion générale

La performance de l'intervention par la photogrammétrie rapprochée est détecté dans les travaux topographiques qui demande une grande densification des données (points levés 3 D), pour avoir atteint l'information métrique la plus précise de la scène, si on assure les conditions adéquates d'acquisition et de modélisation 3D, cette dernière qui permet d'analyser et de présenter les données obtenues après le travail photogrammétrique. En outre ces types des projets de la photogrammétrie rapprochée classée parmi les techniques favorables en matière de temps, coût et même de précision.

Les dernières avancées technologiques spécialement en matière du logiciel rendre les travaux topographiques issus de la photogrammétrie rapprochés plus simplifiés, en partant du constat que la photogrammétrie numérique permet de retrouver des informations métriques de la scène et que la modélisation 3D permet d'analyser et de présenter les données.

L'appréciation des avantages et des inconvénients de l'utilisation de ces techniques passes par l'évaluation de la valeur ajoutée, des difficultés que ces approches entraînent pendant le travail et par l'évaluation des résultats.

Parmi les valeurs ajoutées de cette méthode de traitement photogrammétrique on trouve :

- Les travaux peuvent générer par un matériel très modestes par rapport au matériel de la photogrammétrie ancienne, par exemple la prise de vues on peut travailler avec des caméras amateur.
- La prise de vues peut réaliser sur les différents axes (verticale, horizontale et même oblique), ce qui permet d'atteindre les angles morts (difficilement accessible par les techniques traditionnelles) lors de la prise de vues.
- La détection des cibles de repérage (points de calage) automatiquement ce qui diminue l'erreur accidentel (erreur due à la manipulation d'utilisateur) ou de mauvaise manipulation.
- La modélisation 3D permet de reproduire virtuellement et d'exploiter tous les éléments reproduits pour des investigations plus spécifiques.
- Une densification énorme du nuage de points du levé photogrammétrique.
- De plus la photogrammétrie à l'inverse de la topographie classique donne une représentation continue des scènes photographies.

Par contre les précautions de cette technique sont liées à l'obligation d'adapter la méthodologie de travail aux besoins photogrammétriques :

- Connaissance des conditions de prise de vues pour une même série de photographies. De préférence le ciel complètement dégagé ou ciel nuageux pour assurer le même éclairage.

- L'ombre des objets sur la scène, on peut résoudre ce problème par l'utilisation de flash mais la qualité de photo sera dégradée. Ce problème perturbe le détecteur SIFT.
- Le nombre de photographies réalisés supérieur par rapport à la photogrammétrie rapprochée. car l'approche de cette technique cherche à augmenter la distance de recouvrement pour assurer une meilleure condition pour la détection des points homologues.

L'inconvénient de cette technique réside dans la partie traitement qui demande un niveau avancé de l'utilisateur par rapport aux techniques traditionnelles (topographie classique).

Finalement, ces différentes considérations illustrent le fait que l'utilisation de la photogrammétrie numérique conduit à la simplification et à la diminution du temps de travail lors de l'acquisition de données, surtout dans les situations où des mesures précises, et détaillées doivent être réalisées, et que le coût du matériel est bas par contre des connaissances nécessaires pour l'application de cette technique est relativement exigeante.

Références Bibliographique

F. Gervais, (février, 2010), PDF : Éléments de photogrammétrie.

Culture 3D Cloud, (2010), PDF : Guide pour la prise de vue photogramétrique à destination de la plateforme C3DC.

Ferrières, (2004), Livre : Éléments de technologie pour comprendre la photographie.

DEPLANCKE.M, (2014), PDF : Etude de précision de la photogrammétrie terrestre appliquée aux levés topographiques.

Lorenzo.L, (2009), PDF : La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques.

Thibaut Dudka, (2015), PDF : Photogrammétrie et Modélisation 3D à partir d'images drone au sein de TPLM-3D.

Isabelle ADRIEN, (2010), PDF : Du cadastre 2D vers un cadastre 3D.

RAPHAËLE HENO, (2014), COURS PDF : Production photogramétrique rapproché : Prise de vue photogramétrique.

ANTOINE PINTE, (2015), COURS PDF : Production photogramétrique rapproché : Éléments de géoréférencement et notions de photographie.

LAURE CHANDELIER, (2011), COURS PDF : La prise de vues photogrammétriques.

LECLERC.A, (2015), PDF : Analyse multi échelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol.

DMITRY SEMYONOV (ÉQUIPE AGISOFT), (2011), FORUM WEB:
<http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0>

JULIA CHEMINADE, (2015), PDF : La photogrammétrie en odontologie légale : conditions d'acquisition des données et exemples d'application.

NOLWENN QUERE, (2013), PDF : Représentation 3D d'un site archéologique par photomodélisation : application au monastère de Saint-Hilarion, Palestine.

JEAN-FRANCOIS HULLO, (2013), PDF : Consolidation de relevés laser d'intérieurs construits : pour une approche probabiliste initialisée par géolocalisation.

ACHOUR.T, (2007), PDF : Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens.

Webographie

[<http://photo.insa.free.fr>]

<https://www.gim-international.com/content/article/selecting-cameras-for-uav-surveys>

<http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/apropos-rappel.html> [1]

<http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/methodes-auscultation.html> [2]

www.3dreshaper.com

www.i3map.fr

<http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0> [3]