

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المركز الجامعي لعين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Institut des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : VOA

Thème :

Essais de reconstitution 3D par photogrammétrie terrestre : Cas des petites constructions.

Présenté Par :

- ✓ BOUHADJEB Bilel
- ✓ BEKRALED Abderrahmane

Soutenu le **15/09/2020**

Devant le jury composé de :

Président :

Mr AMARA Khaled

CUBBAT (Ain Témouchent)

Examineur :

Mr GUELLIL Mustapha

CUBBAT (Ain Témouchent)

Encadreur :

Mr KADDOUR Hakim

CUBBAT (Ain Témouchent)

Année universitaire 2019/2020

بسم الله الرحمن الرحيم

اول شكر نهديه لله عز وجل على توفيقنا لإنجاز مذكرتنا، كما نهدى
شكرنا الخالص من أعماق القلب الى أستاذنا المحترم قدور عبد الحكيم
الذي كان هو بصيرتنا في هذا المشوار، كان سخيا علينا بأفكاره
ومعلوماته القيمة حيث كان معنا كالأب وابنه من خلال نصائحه
وارشاداته. نتمنى له كل الخير والنجاح والفوز بالفر دوس الأعلى ان
شاء الله. ونهدى أيضا شكرنا الى والدينا واخوتنا واخواتنا الذين كانوا
سندا لنا في رحلتنا الدراسية ماديا ومعنويا في شتى الظروف نهدى
أيضا شكرنا للزميلة التاج فاطمة لمساعدتها لنا في بعض الاشكاليات
وأخيرا نهدى شكرنا الى جميع الأصدقاء وزملاء الدراسة الذين
شجعونا خلال هذا المشوار.

Dédicace :

A nos chers parents

A nos chers frères

A nos chères sœurs

A tous nos amis et proches

A tous nos collègues de la promotion

2019 / 2020

Avant-propos :

Depuis la mutation de la photogrammétrie analogique vers la photogrammétrie numérique, cette dernière a connu de multitude applicative dans des domaines très variés (Industrielles, Agricultures, engineering, scientifiques...etc.). Des centaines d'applications liées basées sur la photo sont devenues accessibles et à la portée de tout le monde via les téléphones cellulaires.

Sur le plan académique, la photogrammétrie est devenue liée étroitement avec l'informatique (Computer vision, Robotique, la programmation et le traitement d'images).

Mieux encore, On retrouve des départements nommés « de Génie civil et de photogrammétrie » dans des universités de renommé mondiale, et ceci vu la relation étroite des applications de la nouvelle photogrammétrie avec le domaine de constructions de génie civil.

En génie civil comme dans d'autres domaines, on a besoin d'une visualisation 3D efficace permettra d'améliorer ou d'augmenter la compréhension de la réalité et devient alors pertinente, voire essentielle à l'heure actuelle pour répondre aux besoins incessants de l'homme.

En effet, les BIM (building information modeling) et les SIG (système d'informations géographiques) et le géodésien reposent sur la représentation du monde réel de la manière la plus fidèle possible, ce qui implique l'intégration de la photo autant que document métrique, mesurable, dont on peut se baser pour ressortir des analyses, du diagnostic, des décisions...etc. ce qui est l'objectif de la photogrammétrie.

D'où l'idée de proposer le sujet comme introduction à la photogrammétrie en générale afin d'introduire cet axe de recherche à notre département de génie civil. Mais les ambitions dépassent largement le temps : un Projet de fin d'étude regroupant le cadre théorique et une des applications de la photogrammétrie comme produit exemple : la reconstitution 3D par stéréoscopie. Je note que la reconstitution 3D représente un axe à part selon le format d'acquisition ou de traitement.

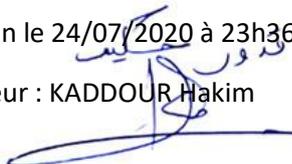
De ce fait, et afin de respecter le temps consacré pour ce projet, j'ai conseillé mes étudiants de ne pas introduire les détails des formules mathématiques, géométriques et de trigonométrie spatiale ni les algorithmes de prétraitement ou de traitement des images et de reconstitution 3D.

Mr Bouhadjeb Bilel et Mr Bekraled Abdelrahmane n'ont pas hésité à prendre le défi pour comprendre la technique de la photogrammétrie (2D et 3D) de zéro, de présenter une synthèse des 30 documents en anglais qu'on avait comme cadre théorique, de lister l'apport de la photogrammétrie dans le domaine de génie civil via des exemples de travaux très récents à travers le monde et enfin de maîtriser le logiciel Photomodeler après une classification intéressante sur les produit logiciel dans ce domaine, et enfin de faire ressortir une maquette satisfaisantes sur des objets très familiale pour nous à l'université.

Je considère que ce mémoire représente un document de référence pour les travaux ultérieurs sur le même axe de recherche. Je remercie mes étudiants pour les efforts déployés.

Fait à Oran le 24/07/2020 à 23h36

L'encadreur : KADDOUR Hakim



Résumé :

L'un des puissants outils géomatiques d'acquisition des données est la photogrammétrie, elle a pris part dans divers domaines notamment en génie civil. L'objectif de notre étude est de présenter les concepts de base sur cette technique spécialement la photogrammétrie terrestre, de mettre en valeur son importance à travers des exemples de projets en génie civil et de synthétiser les produits logiciels photogrammétriques. Le résultat de cette étude est concrétisé par une reconstitution 3D de deux petites constructions (monument et façade) en utilisant une caméra ordinaire de téléphone portable et un traitement d'images sur photomodeler approprié.

Mots-clés : Photogrammétrie terrestre, reconstitution 3D, technique d'acquisition, traitement d'images.

ملخص:

يعد القياس التصويري أحد أقوى أدوات الحصول على البيانات الجيوماتيكية، وقد شارك في العديد من المجالات بما في ذلك الهندسة المدنية. والهدف من دراستنا هو تقديم المفاهيم الأساسية لهذه التقنية، وخاصة التصوير الأرضي، لتسليط الضوء على أهميتها من خلال أمثلة من المشاريع الهندسية المدنية ولتجميع منتجات برامج القياس التصويري. تتجسد نتيجة هذه الدراسة من خلال إعادة بناء ثلاثية الأبعاد لمبنيين صغيرين (نصب تذكاري وواجهة) باستخدام كاميرا هاتف خلوي عادية ومعالجة صور نموذجية بالبرنامج " فوتومودلار".

الكلمات المفتاحية: المسح التصويري الأرضي، إعادة البناء ثلاثي الأبعاد، تقنية الالتقاط، معالجة الصور.

Abstract :

One of the powerful geomatics data acquisition tools is photogrammetry, it has taken part in various fields including civil engineering. The objective of our study is to present the basic concepts on this technique especially terrestrial photogrammetry, to highlight its importance through examples of civil engineering projects and to synthesize the photogrammetric software products. The result of this study is concretized by a 3D reconstruction of two small constructions (monument and facade) using an ordinary cell phone camera and appropriate Photomodeler image processing.

Keywords: Terrestrial photogrammetry, 3D reconstruction, acquisition technique, image processing.

Sommaire :

Remerciement.....	I
Dédicace :.....	II
Avant-propos :.....	III
Résumé :	IV
:ملخص.....	IV
Abstract :.....	IV
Sommaire :	V
Liste des Figures :.....	IX
Liste des tableaux :.....	XIV
Introduction Générale :.....	1
Chapitre 01 : Introduction à la Photogrammétrie	3
1. L'histoire de la photogrammétrie	4
2. Définition de la photogrammétrie :	8
3. Les catégories de la photogrammétrie :	9
4. Les type de la photogrammétrie :.....	11
4.1. Photogrammétrie aérienne :.....	11
4.2. Photogrammétrie terrestre :.....	11
4.3. Photogrammétrie spatiale :	11
5. Avantage de la photogrammétrie terrestre :.....	12
Chapitre 02 : Comment fonctionne le système photogrammétrique.....	14
1. Principe de la photogrammétrie :.....	15
1.1. Schéma général pour une seul photo :	16
1.2. Les paramètre internes et externes de l'appareille de prise :	17
1.1.1. Paramètres internes :.....	17
1.1.2. Les paramètres externes :.....	18
1.3. Le calibrage de l'appareil :	18
1.4. Les points de calage :	21
2. La différence entre la photo et la carte :	25
2.1. Définition du pixel :.....	25
2.2. La différence :.....	26
3. Les défit de la conversion pour avoir une photo mesurable	27
3.1. Le phénomène de perspective :.....	27
3.2. Le phénomène de distorsion :.....	29
3.3. La géométrie de la scène :	30

4.	La vision stéréoscopique	32
4.1.	Principe de recouvrement stéréoscopique :	32
4.2.	Recouvrement :	35
4.3.	Configuration des points de calage :	37
4.4.	La reconstituions par triangulation :	38
4.5.	MNT et Ortho-photo plan	39
5.	La photogrammétrie terrestre est plus complexe que la photogrammétrie aérienne :	40
Chapitre 03 : Etat de l’art de la Photogrammétrie Terrestre		41
1.	Logiciel :	42
1.1.	Solutions web :	42
1.2.	Les logiciels libres d’accès :	42
1.3.	Solutions commerciales :	43
1.4.	Application mobile :	43
2.	Traitement de reconstitution :	44
2.1.	Traitement d'image unique.....	45
2.2.	Traitement stéréoscopique :	45
2.3.	Traitement multi-image :	46
3.	Les solution complète :	47
4.	Matériels d’acquisition :	52
4.1.	Les types des caméras :	52
4.2.	La classification des caméras par frame :	54
4.3.	Les équipements supplémentaires (les objectifs) :	56
5.	Matériels de traitement (configuration des PC pour les logiciels).....	57
.6	Paramétrage recommandé pour l’appareil photographique :	60
6.1.	La résolution :	60
6.2.	La distance focale :	60
6.3.	L’ouverture :	61
6.4.	La vitesse d’obturation :	61
6.5.	La sensibilité ISO :	62
.7	Méthodologie de prise de vue :	63
7.1.	Prise de vue circulaire simple :	63
7.2.	Prise de vue circulaire (cercle concentrique) :	63
7.3.	Prise de vue linéaire :	64
7.4.	Autre configuration :	64
Chapitre 04 : Les applications à la Photogrammétrie		66
1.	Introduction :	67

2.	Les exemples d'application dans différents domaines :	67
2.1.	Travaux archéologiques ou architecturaux :	67
2.2.	Arpentage d'ingénierie :	70
2.2.1.	Documentation intégrée :	70
2.2.2.	Mesure de la cage d'escalier :	71
2.3.	Reconnaissance de forme :	71
2.4.	Industrie aérospatiale :	73
2.5.	Médecine :	78
2.6.	Risques majeurs :	81
2.7.	Ecologie :	83
2.8.	Détection des mouvements :	86
2.9.	L'agriculture :	87
.3	Exemples d'application en génie civil :	89
3.1.	Auscultation des ponts :	89
3.1.1.	Modélisation photogrammétrique pour l'inspection et l'assainissement des ponts : 89	
3.1.2.	Application de la photogrammétrie à la surveillance des ponts :	91
3.1.3.	Reconstruction 3D de ponts en béton existants à l'aide de méthodes optiques : 93	
3.1.4.	Surveillance du pont à l'aide d'un appareil photo numérique : pont basé sur la photogrammétrie :	96
3.2.	Auscultation d'un barrage :	97
3.3.	Mesure géométrique interne dans une construction	99
3.3.1.	Mesure du toit et de la façade	99
3.4.	Diagnostic des ouvrages :	100
3.4.1.	Exemple fissure d'un pont :	100
3.5.	Calcul de cubature :	103
3.5.1.	Exemple Calcul d'un volume de terre et de sa masse :	103
3.6.	L'analyse des déformations des éléments :	104
3.6.1.	Mesure de la déformation des éléments soudés :	104
3.6.2.	Application de VMS (Visual Monitoring System) à une structure réelle :	107
3.7.	Géo-conception (photoréalisme) :	109
3.7.1.	Modélisation de campus 3D virtuel à l'aide de la photogrammétrie à courte portée : 109	
3.8.	Levé topographique par photogrammétrie :	112
3.9.	Suivi des chantiers :	113

3.9.1. Génération d'un modèle 3D basé sur la photogrammétrie oblique d'UAV (Unmanned Aerial Vehicle) à basse altitude :	113
Chapitre 05 : Applications.....	115
1. Appareil utilisé :	116
2. Logiciel utilisé.....	116
3. Nos premiers essais.....	117
4. Les Essais réussis	120
5. Méthodologie de traitement	122
6. Discussion des résultats	133
Conclusion Générale :	136
Les Annexes :.....	137
Annexe 01 : Rapport de calibration	137
Annexe 02 : Rapport de reconstitution 3D du Croissant	143
Annexe 03 : Rapport de reconstitution 3D de ma façade.....	150
Bibliographie :	158

Liste des Figures :

Figure 1 : Aimé Laussedat.[5].....	4
Figure 2 : Première forme vraiment utile de télédétection en géographie. [56]	5
Figure 3 : Cerfs-volants utilisés pour prendre des photos aériennes.[5].....	5
Figure 4 : stereoplotter.[2].....	5
Figure 5 : Premier avion pour la photographie aérienne.[5]	5
Figure 6 : Un pigeon voyageur avec la caméra miniature. [5]	6
Figure 7 : Leica SD3000 analytical plotter. [1].....	6
Figure 8 : Ordinateur.[2]	6
Figure 9 : Phases de développement photogrammétrique, à la suite d'innovations technologiques.....	8
Figure 10 : Acquisition d'image unique. [12]	9
Figure 11 : Configurations d'image stéréo. [12]	9
Figure 12 : Acquisition multi-images (configuration complète).[12]	10
Figure 13 : Photographie aérienne haute résolution.[5]	11
Figure 14 : La photographie aérienne.[57]	11
Figure 15 : Photographie terrestre.[58]	11
Figure 16 : Photographie spatiale. [59].....	11
Figure 17 : Principe de la mesure photogrammétrique. [12]	15
Figure 18 : triangulation de points simples et multiples. [17]	16
Figure 19 : Produits photogrammétriques typiques. [12]	16
Figure 20 : Séquence de traitement d'image.....	17
Figure 21 : Géométrie des différents paramètres internes de l'appareil photographique. [12] 17	17
Figure 22 : Prises de vues de différentes positions et différent angles. [62].....	18
Figure 23 : les paramètres interne et externe de la caméra. [17]	18
Figure 24 : Photo Modeler Calibration Grid. [61]	19
Figure 25 : La quatrième capture à 180°. [60]	20
Figure 26 : La deuxième capture à 0°. [60]	20
Figure 27 : La troisième capture à -90°. [60].....	20
Figure 28 : La première capture à 90°. [60]	20
Figure 29 : Exemples de champs de test photogrammétriques. [12]	20
Figure 30 : Exemples de cibles rétro réfléchissantes. [12].....	21
Figure 31 : Exemples de cibles circulaires artificielles. [12]	22
Figure 32 : Application de cibles sphériques. [12]	22
Figure 33 : Exemples de cibles de motif de ligne. [12].....	23
Figure 34 : Sélection des cibles codées.....	23
Figure 35 : Principe et exemples de sondes de mesure ciblées. [12]	24
Figure 36 : Principe de l'adaptateur pour la mesure des trous percés. [12].....	24
Figure 37 : Cubes d'adaptateur AICON. [12]	25
Figure 38 : les pixels d'image. [20].....	25
Figure 39 : Géométrie de la carte et de la photo.[56]	26
Figure 40 : Exemple d'image en perspective.[22]	27
Figure 41 : Systèmes de coordonnées: X sont les coordonnées d'objet 3D d'un point; les coordonnées de la caméra 3D du même point sont x^{\sim} ; les coordonnées de l'image 2D de sa projection sont x.[23]	27
Figure 42 : Centres de perspective O, O 'et distance principale c (d'après Kraus 1994).[12].....	28
Figure 43 : image sans distorsion. [24]	29

Figure 44 : un objectif sans distorsion. [24].....	29
Figure 45 : Exemple de distorsion en barillet. [24]	29
Figure 46 : Exemple de distorsion en coussinet. [24]	29
Figure 47 : Exemple de distorsion en moustache. [24].....	29
Figure 48 : image avec distorsion. [24]	29
Figure 49 : Modèle de ville représenté sous forme de polyèdre. À droite : la surface avec trois régions, la région R1 et la région R2 sont séparées par la limite B12, qui n'est que partiellement nette. [25]	31
Figure 50 : principe de la vision stéréoscopique. [26]	32
Figure 51 : Problème de correspondance résultant de différents motifs de surface d'objet dans une image stereo. [12]	33
Figure 52 : points dégalité dans une paire stéréo. □: points correctement appariés. ○: points mal appariés. [12]	34
Figure 53 : Méthodes d'orientation pour les images stéréo.....	34
Figure 54 : cas normal de la photogrammétrie stéréo. [12]	35
Figure 55 : Un bloc rectangulaire régulier de photos aériennes. [27]	36
Figure 56 : Images superposées. [27]	36
Figure 57 : Différents codages des cibles. [30]	37
Figure 58 : Appariement des cibles.[30]	38
Figure 59 : principe de triangulation.....	38
Figure 60 : Rendu en 3D d'un MNT.[31]	39
Figure 61 : exemple d'une ortho photo.[32].....	40
Figure 62 : De l'objet à l'image. [12]	44
Figure 63 : Le processus photogrammétrique : de l'objet au modèle.	45
Figure 64 : Cas normal de la photogrammétrie stéréo. [12]	46
Figure 65 : Traitement multi-image. [12].....	46
Figure 66 : Exemples d'appareils photo compacts numériques.[12].....	52
Figure 67 : GSI INCA 3. [12]	52
Figure 68 : Appareils photo reflex à objectif unique (d'après Marchesi 1985). [12]	52
Figure 69 : Hasselblad H4D-60. [12].....	52
Figure 70 : Nikon D3. [12]	52
Figure 71 : Caméra de studio (Sinar). [12]	53
Figure 72 : Caméra haute vitesse avec fixation de miroir stéréo (HS Vision).	53
Figure 73 : Caméra ultra-rapide avec mesure de point intégrée (AICON).....	53
Figure 74 : Stéréo et les systèmes multi-caméras.	54
Figure 75 : les types des capteurs de la caméras. [28]	56
Figure 76 : objectif simple de la caméra. [28].....	56
Figure 77 : objectif grand angle. [28]	57
Figure 78 : téléobjectif. [28].....	57
Figure 79 : objectif fisheye. [28].....	57
Figure 80 : La résolution d'une photo détermine la quantité d'informations utilisable en photogrammétrie. [38]	60
Figure 81 : La distance focale désigne le "zoom".[38]	60
Figure 82 : Le flou d'arrière-plan, bien qu'esthétique, est l'ennemi de la photogrammétrie. [38]	61
Figure 83 : Le temps d'exposition influe sur la luminosité de la photo. [38].....	62
Figure 84 : Augmenter la sensibilité ISO génère des pixels aberrants. [38]	62
Figure 85 : prise de vue simple avec smartphone. [27]	63

Figure 86 : Prise de vue circulaire.	63
Figure 87 : prise de vue linéaire.	64
Figure 88 : Capture d'axe parallèle.	64
Figure 89 : Capture d'axe convergent.	65
Figure 90 : Capture des intérieurs.	65
Figure 91 : Enregistrement d'images par hélicoptère à l'aide d'une caméra métrique UMK. [12]	68
Figure 92 : Dessin d'élévation du château. [12].	68
Figure 93 : Coupes détaillées du modèle 3D de Pompéi (FBK Trento, Politecnico di Milano). [12]	69
Figure 94 : Modèle 3D du Forum de Pompéi (FBK Trento, Politecnico di Milano). [12].	69
Figure 95 : Enregistrement du temple d'Hadrien par projection de franges et photogrammétrie (AICON / Breuckmann, Institut archéologique autrichien). [12]	70
Figure 96: Images métriques de tuyauterie (INVERS). [12]	71
Figure 97: Modèle de fil CAO et vue rendue de la tuyauterie (INVERS). [12].	71
Figure 98: Mesure photogrammétrique de la cage d'escalier (AICON, ThyssenKrupp). [12]	71
Figure 99: Graphique de scène des points de contrôle. [41]	72
Figure 100: Enregistrement photogrammétrique des trépieds d'éoliennes (AICON). [12]	74
Figure 101 : Mesure photogrammétrique des gabarits et composants d'aéronefs (Airbus). [12]	75
Figure 102 : Mesure photogrammétrique en ligne dans la construction aéronautique (GDV, Airbus). [12].	75
Figure 103: Modélisation 3D d'une carrosserie (GOM). [12].	76
Figure 104: Séquence d'images stéréo d'un test de choc à la tête (Volkswagen). [12]	77
Figure 105: Mesure photogrammétrique de cibles pour une expérience de torsion (Volkswagen). [12]	77
Figure 106: Acquisition photogrammétrique du retrait de soudage (AICON)	78
Figure 107 : Visualisation 3D de la mesure du dos humain (Gäbel 1993). [12]	79
Figure 108 : Configuration d'image multiple pour le dos. [12]	79
Figure 109 : Systèmes à double caméra pour applications médicales. [12]	80
Figure 110 : Outils chirurgicaux avec points de référence spatiaux. [12]	81
Figure 111 : Plan de mise en œuvre pour l'insertion d'une articulation de la hanche (Plus Orthopedics). [12]	81
Figure 112: Enregistrement d'accident photogrammétrique (Photometric). [12]	82
Figure 113: Casier judiciaire photogrammétrique (Institut für Rechtsmedizin, Université de Berne). [12]	83
Figure 114: Un exemple de strates délimitées sur des images aériennes numériques de GSD 10 cm montrées dans la fenêtre 2D du module Stereo Draw à une atténuation de 25%. [42]	84
Figure 115 : Images stéréo pour l'enregistrement photogrammétrique d'une toile d'araignée (TU Darmstadt). [12]	85
Figure 116 : Reconstruction de la toile d'araignée. [12].	85
Figure 117: Modèle de hauteur et modèle de drainage générés par photogrammétrie (Université de Berne). [12].	86
Figure 118: Enregistrement photogrammétrique du mouvement des glaciers (IPF TU Dresden). [12]	86
Figure 119: Changements d'altitude calculés à l'emplacement d'un glacier sur 24 heures (diagramme supérieur) et courbe de marée correspondante (diagramme inférieur) (IPF TU Dresden). [12]	87

Figure 120: Participation de la composante mouvement vertical des glaciers avec l'amplitude des marées (IPG / IPF TU Dresden). [12].....	87
Figure 121: Modèles 3D de 17 plants de tomates obtenus par photogrammétrie à courte portée, volume et quelques photographies de plantes réelles. [43].....	88
Figure 122 : génie civil. [12]	89
Figure 123 : Trajectoires de vol prévues et réelles. [44].....	90
Figure 124 : Reconstruction complète du pont. [44].....	90
Figure 125 : Test de fluage; et test de défaillance.[45].....	91
Figure 126 : Résultats photogrammétriques par rapport aux LVDT pour le test de fluage.[45]	92
Figure 127 : contrôlé les cibles. [45]	92
Figure 128 : Matériel d'acquisition de données. (a) Balayage laser terrestre — RIEGL VZ-400, (b) CRP — Canon EOS 5D, (c) véhicule aérien sans pilote — Balayage de site 3DR et (d) balayage infrarouge — Matterport Pro2 3D. [46].....	93
Figure 129 : Modèles 3D du pont de Påunakbäcken. [46]	94
Figure 130 : Modèles 3D du pont Pahtajokk . [46]	94
Figure 131 : Modèles 3D du pont Juovajokk. [46]	94
Figure 132 : Modèles 3D du pont Kedkejokk. [46].....	94
Figure 133 : Modèles 3D du pont Kalkälleväagen. [46]	94
Figure 134 : Visualisations de nuages de points de la culée du pont de Pahtajokk. [46].....	94
Figure 135 : Différents points de vue et triangulation de la position de la caméra résultante de Påunakbäcken. [46].....	95
Figure 136 : Déplacement horizontal et vertical des pixels pour le pont 1. [47].....	96
Figure 137 : la caméra utilisée dans cette étude SONY Cyber-Shot RX10 IV. [47]	96
Figure 138 : static GPS. [47]	97
Figure 139 : (A) Vue d'ensemble du site, (B) Pont 1, Pont routier à courte portée, (C) Pont 2, Pont routier à portée moyenne, et (D) Pont 3, Pont local à portée moyenne. [47].....	97
Figure 140 : Vue d'aval du barrage d'Escoubous. [48].....	98
Figure 141: Nuage de points 3D colorisés reconstitué par photogrammétrie. [48].....	98
Figure 142 : Mesure de façade et simulation de la nouvelle couleur du bâtiment (IAPG Oldenburg). [12].....	100
Figure 143 : Analyse d'image pour la planification de l'installation d'un panneau solaire sur un toit (IAPG Oldenburg). [12]	100
Figure 144 : Analyse des fissures. [49]	101
Figure 145 : fissure visible au support du tablier du pont. [49].....	101
Figure 146 : De gauche Agisoft PhotoScan: Section d'un nuage de points. Droite: image agrandie du nuage de points. [49]	101
Figure 147 : Configuration d'imagerie (IAPG Oldenburg). [12].....	102
Figure 148 : Vecteurs de déformation résultants entre deux mesures séquentielles (IAPG Oldenburg). [12].....	102
Figure 149 : Tas de terre traité. [50]	103
Figure 150 : Modèle numérique de terrain généré à l'aide du GPS (Source : personnelle). [50]	103
Figure 151 : Modèle numérique de terrain généré à l'aide de la station totale (Source : personnelle). [50].....	104
Figure 152 : De gauche à droite : Maillage fermé (coloré et monochrome) du Nikon Coolpix S3500, Du Sony NEX-7 (Source : personnelle). [50].....	104
Figure 153 : Points de mesure marqués dans l'élément soudé. [51].....	105

Figure 154 : Vue de l'élément soudé: a) points de mesure marqués de l'élément soudé, b) essai de traction gréement, c) modèles de déformation. [51]	105
Figure 155 : Comparaison entre VMS et MTS-810. [51]	106
Figure 156 : Vue de la structure de simulation pour l'acquisition d'images en 3 dimensions: a) image de gauche, b) image de droite. [51]	107
Figure 157 : Schéma de simulation. [51].....	107
Figure 158 : Déplacement forcé de la cible. [51]	108
Figure 159 : Vue des caméras CCD et du système informatique avec VMS. [51].....	108
Figure 160 : The flow diagram of the methodology	110
Figure 161 : Caméra Sony DSC HX7V utilisée pour l'acquisition d'images.....	110
Figure 162 : Positions de la caméra pendant l'acquisition de données. [52]	111
Figure 163 : Modèle texturé photo-réaliste 3D virtuel du Département de génie civil, IIT-Roorkee. [52].....	111
Figure 164 : levé topographique aérien par la technique de photogrammétrie [54]	112
Figure 165 : a) L'UAV multi-rotor équipé d'une caméra à 5 lentilles. b) Un ensemble d'images d'exposition à un moment donné. [55]	113
Figure 166 : a) Planification de l'itinéraire de vol de la zone d'étude. b) L'image ortho mosaïque de la zone d'étude. [55]	113
Figure 167 : a) Le modèle de maillage triangulaire construit pour la zone d'étude.	114
Figure 168 : fenêtre de démarrage pour logiciel «Photomodeler» version 2017	116
Figure 169 : le calibrage de la caméra à partir des cibles fixer sur le malaxeur	117
Figure 170 : traitement des images sur logiciel photomodeler.....	117
Figure 171 : photos pour la façade du laboratoire du génie civil	118
Figure 172 : le maillage de la façade du laboratoire suivant le recouvrement obtenu	119
Figure 173 : les résultats de liaison des points de calage détecter automatiquement	119
Figure 174 : résultat de traitement après la liaison automatique de points de calages	120
Figure 175 : prise de vue pour le monument << croissant>>	120
Figure 176 : les problèmes trouver durant la prise de vue	121
Figure 177 : différente type de point de marque	122
Figure 178 : la délimitation de l'objet.....	123
Figure 179 : la correspondre du point N069 son homologue sur la photo de gauche à l'aide de la ligne discontinu	124
Figure 180 : les paramètres à choisir pour faire la modélisation.....	125
Figure 181 : la détection automatique des images.....	125
Figure 182 : le résultat de la détection automatique	126
Figure 183 : résultat de nuage de point densifier	127
Figure 184 : paramètres du maillage	128
Figure 185 : résultat du maillage.....	129
Figure 186 : monument détailler sons bruits de pixels ou objets indésirables	129
Figure 187 : les prises de vues de la façade choisi	130
Figure 188 : la correspondance du point N513 dans les trois photos	130
Figure 189 : nuage des points qui représente la façade	131
Figure 190 : résultat après maillage.....	131
Figure 191 : résultat après texture.....	132
Figure 192 : résultat final du traitement.....	132
Figure 193 : courbe montre l'erreur du traitement de croissant	133
Figure 194 : courbe montre l'erreur du traitement de la façade	134
Figure 195 : les déformations des vitres du 1er étage de la façade	135

Figure 196 : histogramme d'erreur de reprojection moyenne	145
Figure 197 : Histogramme d'erreur de reprojection moyenne.....	153

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Différences entre les photographies et les cartes.....	26
Tableau 2 : liste des meilleures applications mobile.[63]	43
Tableau 3 : Appareils photo numériques terrestres les plus courants (Sans objectif). [30]	54
Tableau 4 : Appareils photo et systèmes numériques aéroportés primaires. [30]	55
Tableau 5: surveillance des déformations. [41]	72
Tableau 6 : Catégories de classification des forêts et des terres forestières pour la photo- interprétation d'images aériennes numériques. [42]	84
Tableau 7 : Coordonnées initiales des cibles. [51]	109
Tableau 8 : Résultats de comparaison entre la valeur totale de la station et la valeur VMS en fonction du déplacement forcé. [51]	109
Tableau 9 : résultats de la reconstitution des photos.....	118

Introduction Générale :

La photographie représente l'un des puissants supports qui représente une partie de notre monde réel. Elle nous transmet l'aspect visuel sur les couleurs et les formes à un instant T, sauf que son support papier ou numérique est en deux dimensions, d'où une déformation et une dégradation sur l'extraction exactes des distances, des surfaces, des orientations et des formes.

La photogrammétrie a vu naître pour remédier à ces problèmes, en autre terme : rendre la photographie mesurable comme une carte, dont l'échelle est bien déterminée.

Un tel produit offrira un gain énorme en temps et en coûts d'élaboration des plans et des cartes, la photo ne nécessite qu'un simple appareil ou une capture de fraction de seconde pour avoir le résultat

Ce résultat plein d'anomalie géométrique comme le phénomène de perspective et de distorsion de l'image présente d'autres aspects particuliers : le format de présentation ; la photo est un document dit de format Raster ou matricielle tout à fait différent de format vectorielle des cartes.

Donc nous sommes face à plusieurs déficits afin d'exploiter la photo comme document métrique.

Avec l'avènement de la technique de reconstitution tridimensionnelle par stéréoscopie en photogrammétrie aérienne, il est devenu possible d'avoir le MNT (modèle numérique de terrain) donc l'altitude en chaque point par couple de photos chevauchées. Le phénomène de perspective est soulevé par ortho-photo plan.

La photogrammétrie aérienne a connu un développement remarquable vu qu'elle présente des atouts sur sa géométrie d'acquisition. Si on connaît l'altitude de l'avion, les paramètres de la chambre métrique (camera photogrammétrique), le pourcentage de chevauchement entre les photos prises ; les paramètres inconnus de la scène (terrain) seront assez simples pour leurs définitions.

Même sans stéréoscopie, c'est-à-dire l'utilisation d'une seule photo, il est possible d'avoir des résultats bien précis sur le plan planimétrique du terrain.

Hélas, ce n'est pas le cas pour les prises de vue terrestre, on ne connaît pas la distance qui nous sépare avec l'objet photographié, la prise de vue peut tendre vers l'horizon, on utilise des appareils dont on connaît seulement leur marque et leur résolution ! et pour la stéréoscopie, on a aucune information sur le pourcentage de chevauchement des photos.

Bref, on ne peut pas projeter les formules géométriques de la photogrammétrie aérienne à celle terrestre. Ce qui a freiné cet axe jusqu'à la mutation de l'analogique vers le numérique en photogrammétrie, et la production des puissantes machines informatiques.

Il est devenu possible de calculer la distance camera-scène après calibrage et connaissance des paramètres internes de la caméra, on peut aussi ne pas faire souci sur les angles de prises de vue sauf d'assurer par estimation visuelle un bon chevauchement entre les photos

Pour enfin avoir un assemblage de toutes les photos dans un produit tridimensionnel dont on peut faire du zoom du panoramique et de la rotation libre sur les trois axes.

- Quelles sont les concepts théoriques liés à cette nouvelle technologie ?
- Quelles sont les méthodes d'acquisition pour avoir un tel produit ?

- Quelles sont les appareils photographiques dédiés pour ce travail ?
- Quelles sont les applications logicielles utiliser dans ce domaine ?
- Est-il des applications de cette technique en Génie civil ?

Les réponses à ces questions et pour d'autres questions pertinentes sont notre objectif de travail pour ce mémoire.

Chapitre 01 :

Introduction à la

Photogrammétrie

1. L'histoire de la photogrammétrie

Les développements menant à la science actuelle de la photogrammétrie se sont produits bien avant l'invention de la photographie. Dès 350 av. Aristote avait évoqué le processus de projection d'images par voie optique. Au début du 18^{-ème} siècle, le Dr Brook Taylor a publié son traité sur la perspective linéaire, et peu de temps après, J. H. Lambert a suggéré que les principes de la perspective pourraient être utilisés dans la préparation des cartes.[1]

Phases historiques de la photogrammétrie[2] :

- Instruments photographiques
- Instruments analogiques
 - Reconstruire par optique et/ou mécanique signifie la géométrie de la formation d'images stéréo
- Instruments analytiques
 - Mesurer les coordonnées d'images sur les photographies à l'aide de méthodes électro-optiques ou mécaniques facilitées par le système visuel humain
 - Utiliser des modèles mathématiques pour calculer les coordonnées 3D
- Instruments numériques
 - Convertir les images en format numérique
 - Utiliser des techniques mathématiques pour trouver des points correspondants
 - Utiliser des modèles mathématiques pour calculer les coordonnées 3D
 - Le coût est plus faible en raison de l'absence d'exigence pour des liaisons électromécaniques-optiques de haute précision
 - Précision
 - Dépend de la taille des pixels
 - N'a pas dépassé l'exactitude des méthodes d'analyse
 - Correspondance encore problématique dans les zones difficiles.

Le développement de la photogrammétrie dépend clairement du développement général de la science et de la technologie. Il est intéressant de noter que les quatre grandes phases de la photogrammétrie sont directement liées aux inventions technologiques de la photographie, des avions, des ordinateurs et de l'électronique.

La première génération, a été une phase d'Instruments photographiques.

L'invention de la photographie a commencé par Daguerre et Niepce en 1839.[3] La photogrammétrie a fortement évolué depuis la première application réalisée par un officier de l'armée française, Aimé Laussedat en 1849 sur la façade de l'Hôtel des Invalides.[4] En 1859, le colonel Laussedat a présenté un compte rendu de ses succès dans la cartographie à l'aide de photographies. Son travail de pionnier et son dévouement à ce sujet lui ont valu le titre de «père de la photogrammétrie».[1] En 1862, l'utilisation de la photographie par Laussedat pour la cartographie est officiellement acceptée par l'Académie des sciences de Madrid. Il a également essayé la photographie en ballon, mais l'a abandonnée en raison de la difficulté d'obtenir un nombre suffisant de photographies pour couvrir toutes les zones d'une station aérienne.[5]

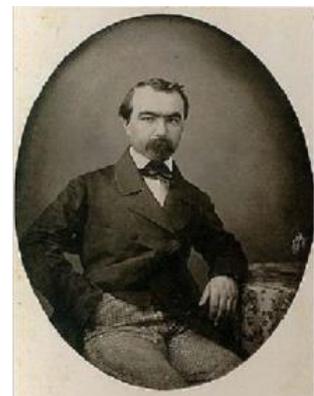


Figure 1 : Aimé Laussedat.[5]

Laussedat a ensuite fait un plan de Paris à partir de photographies prises sur les toits des bâtiments, qui a été exposée à l'Exposition de Paris en 1867.[6] En 1873 Laussedat devient professeur au CNAM.[4] En 1855, Gaspard Felix Tournachon (AKA Nadar) a été la première personne à obtenir une photographie aérienne alors qu'il était suspendu à partir d'un ballon à 80 mètres dans le ciel (Burtch 2004).[7] La photogrammétrie n'a cessé d'évoluer depuis que ces premiers vols réussis ont été conduits par l'avant d'abord par des opérations militaires à des fins de reconnaissance. En 1859, l'empereur Napoléon ordonna à Nadar d'obtenir des photographies de reconnaissance en préparation de la bataille de Solferino et, dans les années 1870, l'armée russe organisa un détachement sur le terrain pour obtenir des photos stéréo (Burtch 2004). [7]



Figure 2 : Première forme vraiment utile de télédétection en géographie. [56]

Le météorologue anglais E. D. Archibald fut parmi les premiers à prendre avec succès des photographies de cerfs-volants en 1882.[5] Par l'histoire la photogrammétrie inventée en France, ensuite été développée et industrialisée de façon très complète en Allemagne.[4] L'architecte prussien Meydenbauer est un autre pionnier dans le domaine de la photogrammétrie à courte portée. Il a enregistré de nombreux monuments historiques, églises et bâtiments avec une méthode de photogrammétrie à courte portée basée sur les techniques de Laussedat. En 1885, Meydenbauer a établi un institut d'État à Berlin pour enregistrer les bâtiments architecturaux.[6] La cartographie topographique utilisant la photogrammétrie a été introduite en Amérique du Nord en 1886 par le capitaine Eduard Deville, l'arpenteur général du Canada.[1]

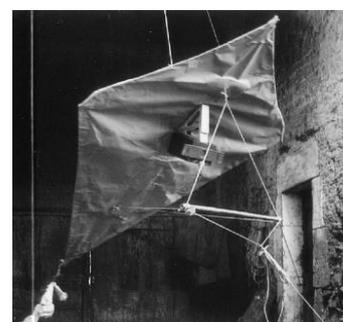


Figure 3 : Cerfs-volants utilisés pour prendre des photos aériennes.[5]

La deuxième génération, généralement appelée **photogrammétrie analogique**, est caractérisée par l'invention de la stéréophotogrammétrie par Pulfrich (1901). Cela a ouvert la voie à la construction du premier traceur stéréoscopique par Orel, en 1908. Les avions et les caméras sont devenus opérationnels pendant la première guerre mondiale. Entre les deux guerres mondiales, les principaux fondements des techniques de levés aériens ont été construits et ils existent encore aujourd'hui.[3] Le développement de la photogrammétrie analogique et l'invention de l'avion par les frères Wright en 1903 ont amélioré la capacité de collecter des données photogramétriques.[7] Pendant la deuxième Guerre mondiale, les techniques photogramétriques ont été largement utilisées pour répondre à la grande nouvelle demande de cartes. L'interprétation des photos aériennes a également été utilisée plus largement que jamais dans la reconnaissance et le renseignement.[1]



Figure 4 : stereoplottter.[2]



Figure 5 : Premier avion pour la photographie aérienne.[5]

La photographie au pigeon est une technique de photographie aérienne inventée en 1907 par l'apothicaire allemand Julius Neubronner. Un pigeon voyageur était équipé d'un harnais de poitrine en aluminium auquel une caméra miniature légère à retardée par le temps pourrait être attachée.[5] La photogrammétrie a parcouru un long chemin en environ 160 ans, de la première photo aérienne acquise au développement d'opérations photogrammétriques haute performance en 2017.[7] En 1909, le Dr Carl Pulfrich d'Allemagne a commencé à expérimenter avec des paires de photographies qui se chevauchaient. Son travail a constitué une grande partie de la fondation pour le développement de nombreuses techniques de cartographie photogrammétrique instrumentale en usage aujourd'hui.[1] Les réalisations pionnières de Laussedat, Meydenbauer et de nombreux autres photogrammétristes ont conduit à la formation de la Société internationale de photogrammétrie (ISP) en 1910, l'un des événements les plus importants de l'histoire de la photogrammétrie. Les commissions techniques de la société ont commencé à travailler dans des domaines spécifiques de la photogrammétrie en 1926, y compris la photogrammétrie aérienne, terrestre, architecturale et technique.[6]



Figure 6 : Un pigeon voyageur avec la caméra miniature. [5]

Avec l'avènement de l'ordinateur dans les 1941, la **troisième génération** a commencé, sous la conception de la **photogrammétrie analytique**. Schmid a été l'un des premiers photogrammétristes à avoir accès à un ordinateur. Il a développé les bases de la photogrammétrie analytique dans les années cinquante, en utilisant l'algèbre matricielle. Pour la première fois, une tentative sérieuse a été faite pour l'employer la théorie de l'ajustement aux mesures photogrammétriques. Le traceur analytique est une autre invention majeure de la troisième génération. Là encore, on observe un décalage entre l'invention et une introduction à la pratique photogrammétrique. Helava a inventé le traceur analytique à la fin des années cinquante. Cependant, les premiers instruments ne sont plus disponibles que dans les années soixante-dix sur une large base.[3] Et aussi en 1970 l'utilisation de la photogrammétrie à courte portée s'est accélérée en raison du développement rapide de la technologie informatique.[6]



Figure 7 : Leica SD3000 analytical plotter. [1]

La **quatrième génération, la photogrammétrie numérique**, dans les années 1988 émerge rapidement comme une nouvelle discipline de la photogrammétrie. Contrairement à toutes les autres phases, des images numériques sont utilisées à la place des photographies aériennes. Avec la disponibilité de dispositifs de stockage qui permettent un accès rapide à l'imagerie numérique et de puces de microprocesseur spéciales, la photogrammétrie numérique a véritablement commencé il y a quelques années seulement. Le domaine en est encore à ses balbutiements et n'a pas encore fait son chemin dans la pratique de la photogrammétrie.[3] C'est également grâce aux développements informatiques que les applications de modélisation tridimensionnelle sont devenues possibles. Ces algorithmes informatiques comprennent des méthodes telles que la transformation de la fonctionnalité invariante d'échelle (SIFT) et les techniques de structure à partir du mouvement (SfM) qui rendent possible la correspondance de photos grâce à l'identification de points clés. C'est grâce à la correspondance des photos dans un ensemble que la reconstruction de scène 3D est rendue possible



Figure 8 : Ordinateur.[2]

ouvrant ainsi de nombreuses nouvelles possibilités pour les opérations photogrammétriques, y compris le calcul de diverses mesures comme le volume. Au fur et à mesure que davantage de recherches sont effectuées sur la modélisation 3D et la capacité de mesure des processus photogrammétriques informatisés, il semble y avoir un énorme potentiel d'innovation pour cette discipline séculaire.[7]

L'histoire de la photogrammétrie a court porter :

Peut-être divisée en quatre période. **La première période 1850 à 1984** et a jeté les bases de la technologie en explorant les systèmes de base. Les théories développées pendant cette période incluent des algorithmes de traitement d'image ; méthodes d'analyse de réseau spatial ; dispositifs à couplage de charge (CCD) pour l'enregistrement d'images numériques ; et méthodes assorti les images des moindres carrés. **La deuxième période 1984 à 1988** et se concentrait sur le développement des premiers systèmes prototypes, y compris l'étalonnage et l'application des systèmes d'imagerie numérique CCD et des méthodes d'acquisition et de traitement de données à grande vitesse. Au cours de cette période de croissance rapide, le nom de ISP Commission V a été changé en « Photogrammétrie à courte portée et vision industrielle ». **La troisième période 1988 à 1992**, au cours de laquelle une nouvelle acceptation et un perfectionnement de la photogrammétrie à courte portée ont eu lieu. Les progrès de cette période comprenaient des applications à croissance rapide et diversifiées, et une recherche et une mise en œuvre accélérées. Alors que les systèmes entièrement automatisés continuaient à être explorés, les mesures photogrammétriques à courte portée de haute précision dans un large éventail d'applications avaient mûri. **Quatrième période (de 1992 à aujourd'hui)** est une période au cours de laquelle la photogrammétrie numérique à courte distance s'est régulièrement développée. Un bon exemple de ces progrès est dans le domaine des capteurs d'images. Au cours de cette période, des puces à haute densité, grand format et petits pixels sont devenues disponibles et il est maintenant techniquement possible de fabriquer une puce CCD contenant 20 000 x 20 000 pixels avec une taille de pixel de 5 µm. Les appareils photo grand public, offrent désormais une résolution pouvant atteindre 20 millions de pixels à un prix relativement bas. En plus des capteurs d'image, le coût des autres composants des systèmes photogrammétriques a également considérablement baissé ; en conséquence, une gamme plus large d'applications est devenue abordable à des fins d'ingénierie. Parmi les autres progrès de cette période figurent le développement de systèmes entièrement numérisés ; acquisition et traitement automatisés de données via des systèmes de vision industrielle ; et une interprétation rapide et claire des données. [6]

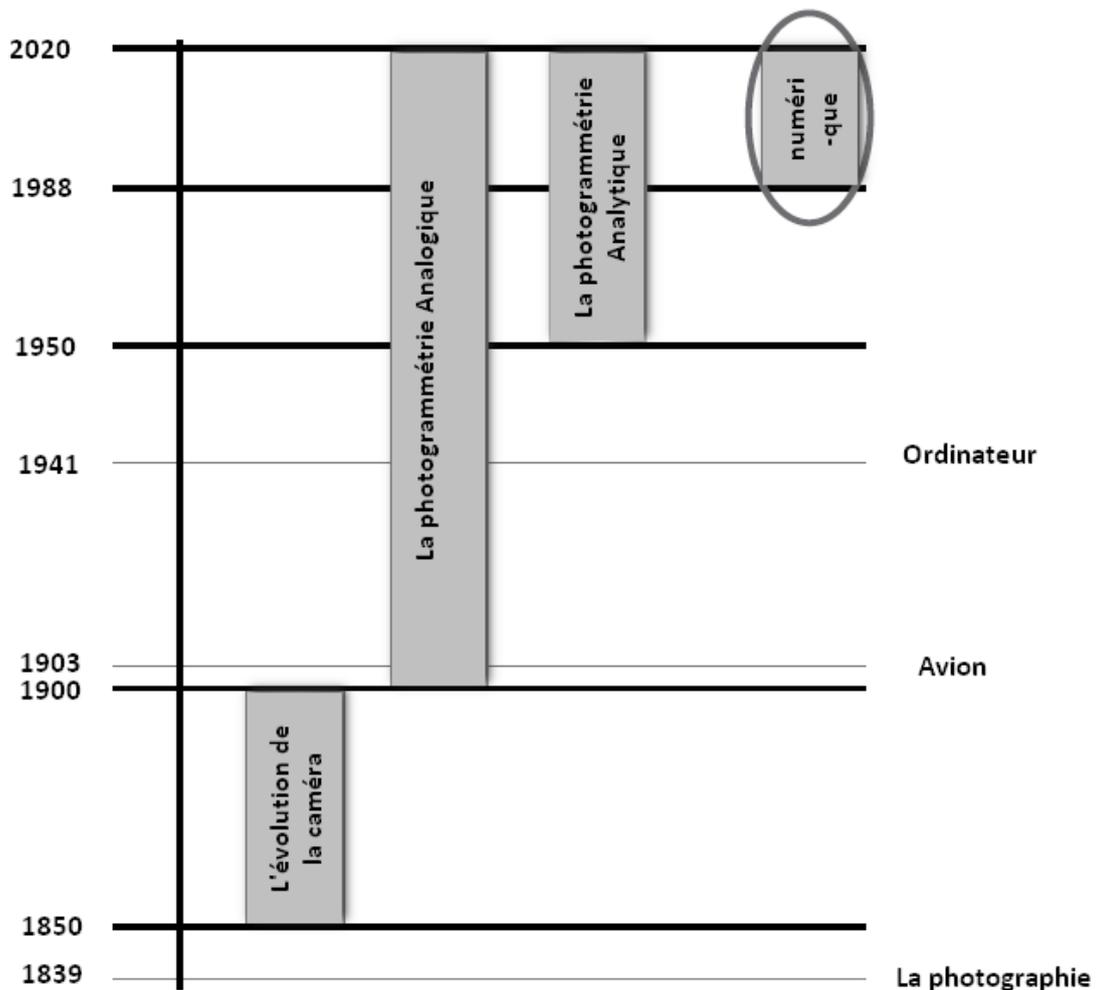


Figure 9 : Phases de développement photogrammétrique, à la suite d'innovations technologiques

2. Définition de la photogrammétrie :

La photogrammétrie est la science de la dérivation de la géométrie tridimensionnelle à partir de photographies. Basée sur les principes de la trigonométrie, la photogrammétrie repose sur des photographies se chevauchant prises à différents endroits.[8] ; Avec la photogrammétrie on peut mesurer la position, la taille et la forme de tout objet physique, à l'aide d'images photographiques bidimensionnelles.[9]« 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 ses rayons (triangulation) qui détermine la position tridimensionnelle du point. (...) »[10] Donc elle fondée sur le modèle mathématique de la perspective centrale.[11]

3. Les catégories de la photogrammétrie :

En CRP (Close-Range Photogrammetry), la distance de l'objet dans l'espace est inférieure à 300 mètres (Matthews, 2008).[12]

La photogrammétrie peut être catégorisée de plusieurs manières :

- Par la position de la caméra et distance de l'objet[12] :
 - Photogrammétrie aérienne : le traitement des photographies aériennes, $h > 300$ m
 - Photogrammétrie terrestre : mesures à partir d'un emplacement terrestre fixe
 - Photogrammétrie à courte portée : distance d'imagerie $d < 300$ m
 - Photogrammétrie macro : échelle d'image > 1 (imagerie microscopique)
 - Cartographie mobile : acquisition des données à partir des véhicules en mouvement, $d < 100$ m
- Par nombre d'images de mesure[12] :
 - Photogrammétrie d'une seule image : traitement d'image unique, mono-traçage, rectification, ortho-photos

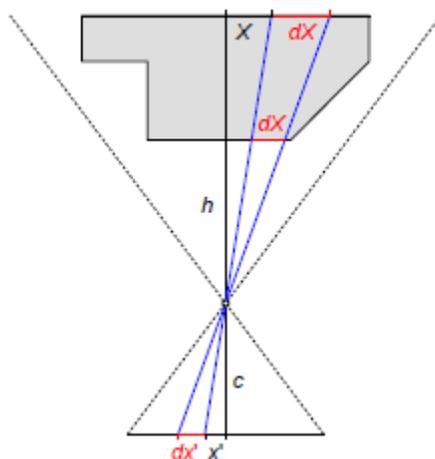


Figure 10 : Acquisition d'image unique. [12]

- Photogrammétrie stéréo : traitement à double image, mesure stéréoscopique

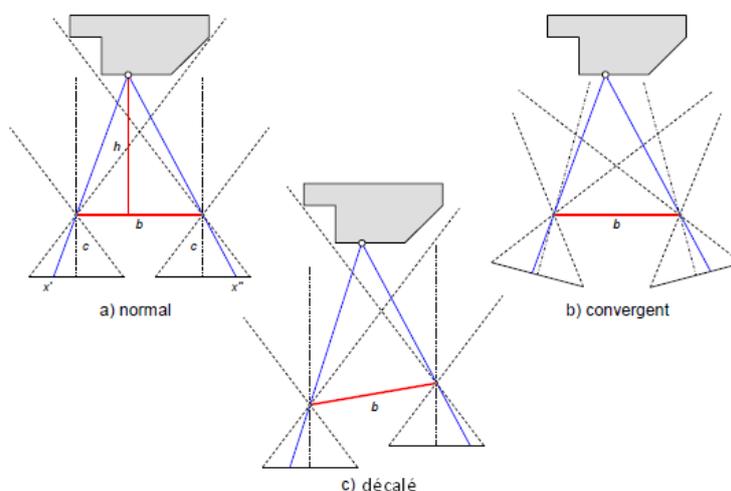


Figure 11 : Configurations d'image stéréo. [12]

- Photogrammétrie multi-images : n images où $n > 2$, triangulation de faisceau

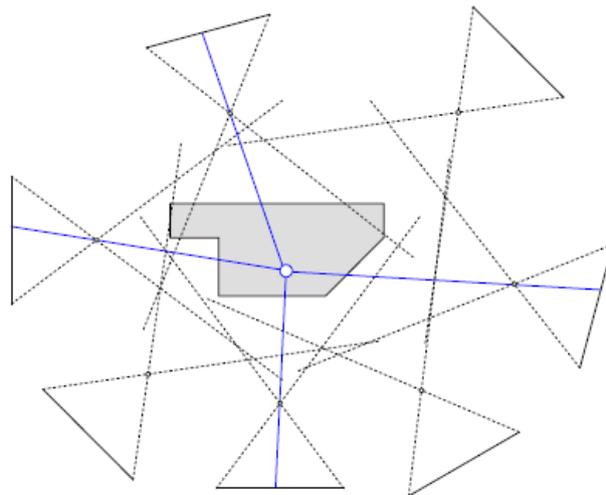


Figure 12 : Acquisition multi-images (configuration complète).[12]

- Par les méthodes d'enregistrement et de traitement[12] :
 - Photogrammétrie de la table plane : l'évaluation graphique (jusqu'en 1930)
 - Photogrammétrie analogique : caméras analogiques, systèmes de mesure opto-mécaniques (jusqu'en 1980)
 - Photogrammétrie analytique : images analogiques, mesures contrôlées par ordinateur
 - Photogrammétrie numérique : images numériques, mesures contrôlées par ordinateur
 - Vidéogrammétrie : acquisition et mesure d'images numériques
 - Photogrammétrie panoramique : imagerie panoramique et traitement
 - Photogrammétrie linéaire : méthodes analytiques basées sur des lignes droites et des polynômes
- Par la disponibilité des résultats de mesure[12] :
 - Photogrammétrie hors ligne : enregistrement d'image numérique séquentiel, séparé dans le temps ou l'emplacement de la mesure
 - Photogrammétrie en ligne : enregistrement d'images simultanées, multiples et numériques, mesure immédiate
 - Photogrammétrie en temps réel : enregistrement et mesure effectués dans un délai spécifié propre à l'application
- Par application ou domaine de spécialité[12] :
 - Photogrammétrie architecturale : architecture, conservation du patrimoine, archéologie
 - Photogrammétrie technique : applications de l'ingénierie générale (construction)
 - Photogrammétrie industrielle : applications industrielles (fabrication)
 - Photogrammétrie médico-légale : applications à divers problèmes juridiques
 - Biostéréométrie : applications médicales
 - Photogrammétrie multimédia : enregistrement sur des supports de différents indices de réfraction
 - Forme à partir de la stéréo : traitement d'image stéréo (vision par ordinateur)
 - Structure à partir du mouvement : traitement multi-image (vision par ordinateur).

4. Les type de la photogrammétrie :

4.1. Photogrammétrie aérienne :

La caméra est montée dans un avion et est généralement pointée verticalement vers le sol. Des avions spécialement conçus sont utilisés pour ce type de photographie.[13] De nombreuses photographies sont prises avec le concept qui se chevauche. [5] En photogrammétrie aérienne, toutes les photos sont prises l'une après l'autre dans la même ligne de vol.[14] Les avions sont faits pour survoler une parcelle de terrain prédéterminée, pointée par des édifices de repère spécifiques. La vitesse de la caméra est réglée en fonction de la vitesse de l'avion. De plus, la hauteur de l'aéronef par rapport au sol est connue.[13] Plus tard, le traitement de ces photographies se fait à l'aide de Le traceur stéréo. Ces photos sont également utilisées dans le traitement automatisé pour produire des cartes topographiques et thématiques et des modèles numériques de terrain (MNT).[2]



Figure 14 : La photographie aérienne.[57]



Figure 13 : Photographie aérienne haute résolution.[5]

4.2. Photogrammétrie terrestre :

Les photographies sont différentes aux autres, une caméra est utilisée en position stationnaire. La caméra est positionnée à un niveau élevé. L'inclinaison et les autres spécifications de la caméra sont toutes contrôlées.[13] et généralement connue, sur ou près du sol et avec l'axe de la caméra en général horizontale (ou proche de l'horizontale).[10] L'instrument utilisé pour exposer une telle photographie s'appelle la photo théodolite.[5] La technique de photogrammétrie terrestre nécessite beaucoup moins d'investissements et de compétences techniques.[15]



Figure 15 : Photographie terrestre.[58]

4.3. Photogrammétrie spatiale :

Dans cette branche de photogrammétrie, les satellites sont utilisés pour prendre des photos. Avec le développement du satellite moderne, une couverture mondiale des imageries satellitaires est possible en moins de temps avec des données haute résolution.[5]



Figure 16 : Photographie spatiale.
[59]

5. Avantage de la photogrammétrie terrestre :

Dans ce paragraphe, on décrit un système de mesure automatique des points de contrôle en photogrammétrie à courte distance. L'une des tâches les plus longues de la photogrammétrie à courte portée lorsque les points de contrôle levés sont nécessaires c'est la localisation correcte des points, le dessin d'esquisse de terrain approprié et la mesure des coordonnées des points d'objet elle-même.

Souvent, deux personnes sont nécessaires pour cette tâche, de sorte que le nombre des sondages augmente. Un système a été développé afin de minimiser et d'améliorer ces opérations. Le système a été développé afin de minimiser et d'améliorer ces opérations. Le système a été développé pour intégrer une station totale robotisée et sans réflecteur, un ordinateur portable et deux appareils photo numériques (objectifs précis « oculaire » et une deuxième caméra pour des vues panoramiques). Les deux images de la caméra peuvent être vues sur l'écran de l'ordinateur portable. En outre, il est possible de gérer la station à partir de l'ordinateur portable. Le système permet d'obtenir l'esquisse et les coordonnées de l'objet du point en peu de temps. Tous les processus sont contrôlés au moyen du logiciel. Le système présente certains avantages par rapport à la méthode conventionnelle de capture de points de contrôle avec élaboration manuelle de croquis, car cela élimine les points de contrôle de croquis fabriqués à la main. Le marquage des points dans l'image se fait instantanément tout au long de l'élaboration du rapport.

Comme principal avantage de ce système, l'ensemble du système peut être contrôlé par un seul opérateur, ce qui suppose une réduction des coûts et de l'organisation, en conséquence, le temps consacré à l'enquête des points de contrôle diminue.

Donc comme conclusion, nous comprenons que c'est un système précis, pratique et peu coûteux, il est aussi un outil très utile en particulier pour naviguer et fournir des images photo-réaliste structurelle 3D utilisant l'approche DCPR pour un transfert facile de l'information.

On peut définir les avantages de la photogrammétrie comme suit :

- Elle présente des résultats précis et rapides qui sont obtenus et traités automatiquement sur un nombre presque illimité de cibles, contrairement aux méthodes topographiques.
- Le matériel n'est pas nécessaire et, par conséquent, le nombre d'appareils disponibles, les restrictions d'espace et les difficultés de positionnement n'existent pas.
- Elle n'est pas sensible aux grands déplacements et n'a pas de limites de portée.
- Il s'agit d'une technique à faible coût puisque des appareils photo numériques non professionnels peuvent être utilisés.
- L'utilisation de la modélisation photogrammétrique permet une plus grande efficacité pour la collecte et la conservation des données.
- Elle Permet une plus grande contextualisation des problèmes et peut améliorer les décisions relatives aux réparations éventuellement nécessaires.
- Elle peut être appliquée par des inspections successives pour créer une accumulation historique de l'état de la structure, que l'on peut revoir à tout moment pour fournir une compréhension plus approfondie sur l'état actuel.
- N'importe quel appareil photo peut être utilisé.
- Les Différents types de caméras peuvent également être utilisés dans un même projet.
- Elle donne la meilleure précision de mesure.

Les inconvénients :

Dans le précédent paragraphe, nous avons cité beaucoup d'avantages, mais cela n'empêche que Nous avons aussi des inconvénients que nous pouvons les résumer comme suit :

- Besoin de stocker des volumes de données importants.
- Expérience élevée en photogrammétrie.
- Nécessité d'un traitement spécifique.
- Complexité du modèle mathématique utilisé pour résoudre les paramètres photogrammétriques.
- Etalonnage nécessaire de la caméra.
- Difficulté de prise de situation appropriée des caméras.
- Résolution régulière difficile de la vue intérieure pour un bâtiment.
- Texture du plafond non précise.

Chapitre 02 :
Comment fonctionne le
système photogrammétrique

1. Principe de la photogrammétrie :

Aujourd'hui, que ce soit avec un appareil photo haut de gamme ou un simple smartphone et les logiciels adaptés, on peut facilement calculer un modèle en trois dimensions. Cependant, dans le domaine scientifique, on a besoin d'un modèle qui respecte quelques règles fondamentales.[16]

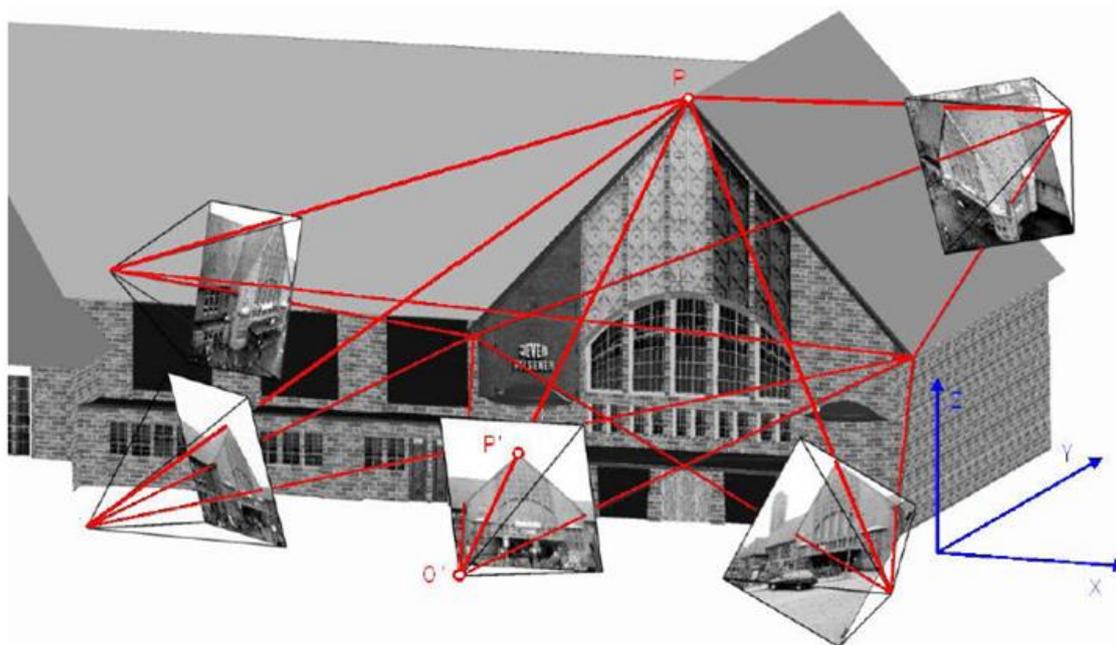


Figure 17 : Principe de la mesure photogrammétrique. [12]

Au-delà de la 3D, la photogrammétrie, c'est l'enregistrement de toutes les données métriques d'une scène ou d'un objet sur un site. La scène est un terme générique désignant un espace ouvert ou fermé dont on a du mal à définir les limites, à la différence de l'objet qui est circonscrit. La scène est souvent fixe, une cave, un boyau de mine, une nécropole ou l'intérieur d'un temple, et on s'y déplace, alors que l'objet est mobile, on le manipule en laboratoire ou en studio photo. [16]

Le principe fondamental utilisé par la photogrammétrie est la triangulation. En prenant des photographies à partir des angles différents et couvrir complètement la scène ou l'objet, ce que l'on appelle des « lignes de visée » peuvent être développées de chaque caméra vers des points sur l'objet. Ces lignes de visée (parfois appelées rayons en raison de leur nature optique) sont intersectées mathématiquement pour produire les coordonnées tridimensionnelles des points d'intérêt. La triangulation est également le principe utilisé par les théodolites pour la mesure des coordonnées. Si vous connaissez ces instruments, vous trouverez de nombreuses similitudes (et quelques différences) entre la photogrammétrie et les théodolites. Encore plus près de chez vous, la triangulation est également la façon dont vos deux yeux travaillent ensemble pour mesurer la distance (appelée perception de la profondeur).

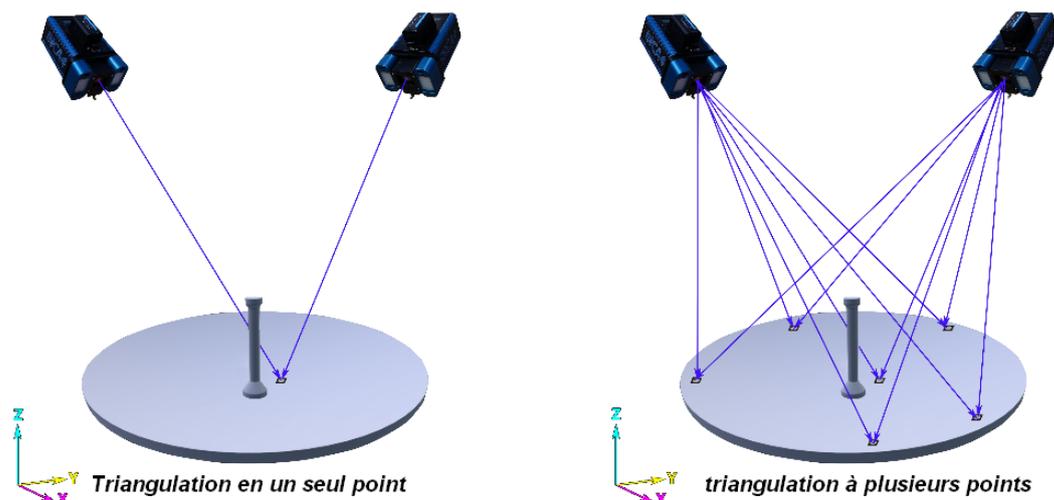


Figure 18 : triangulation de points simples et multiples. [17]

En général, les systèmes photogrammétriques fournissent des coordonnées d'objet tridimensionnelles dérivées de mesures d'image. À partir de ceux-ci, d'autres éléments et dimensions peuvent être dérivés, par exemple des lignes, des distances, des zones et des définitions de surface, ainsi que des informations de qualité telles que des comparaisons avec des données de conception et de commande de la machine. La détermination directe des éléments géométriques tels que les lignes droites, les plans et les cylindres est également possible sans calcul explicite des coordonnées des points. De plus, l'image enregistrée est une mémoire de données objective qui documente l'état de l'objet au moment de l'enregistrement. Les données visuelles peuvent être fournies sous forme d'images de caméra corrigées, d'orthophotographies ou de superpositions graphiques (Figure 19). [12]

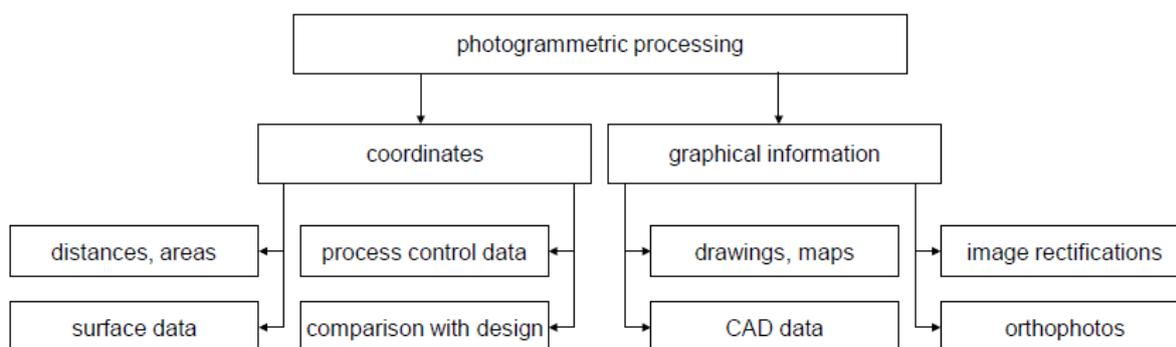


Figure 19 : Produits photogrammétriques typiques. [12]

1.1. Schéma général pour une seule photo :

En photogrammétrie, il est souvent possible d'obtenir des mesures de scène à partir d'une seule photo.

Autrement dit, nous ne créons pas un modèle tridimensionnel afin de pouvoir mesurer les dimensions, mais plutôt avec une seule image qui peut le faire, mais il doit nécessairement y avoir des points connus dans l'image par téléchargement topographique.

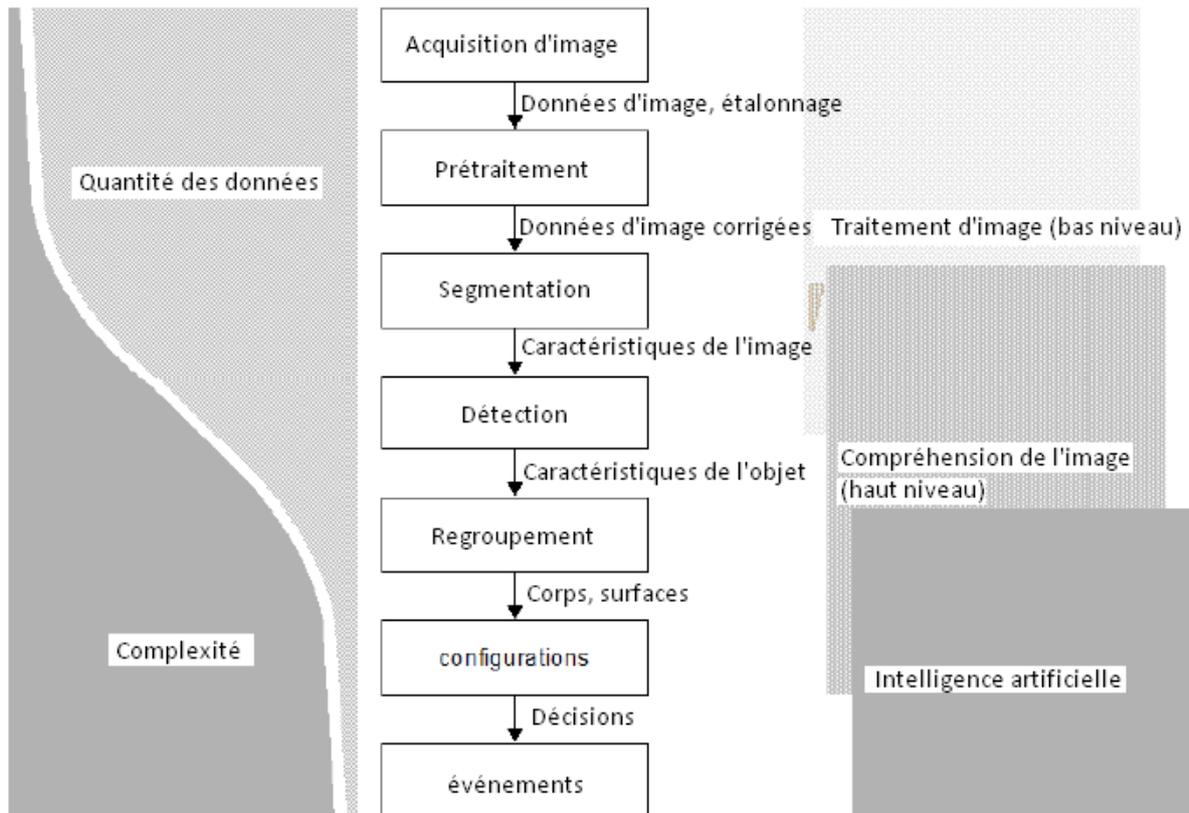


Figure 20 : Séquence de traitement d'image.

1.2. Les paramètres internes et externes de l'appareil de prise :

1.1.1. Paramètres internes :

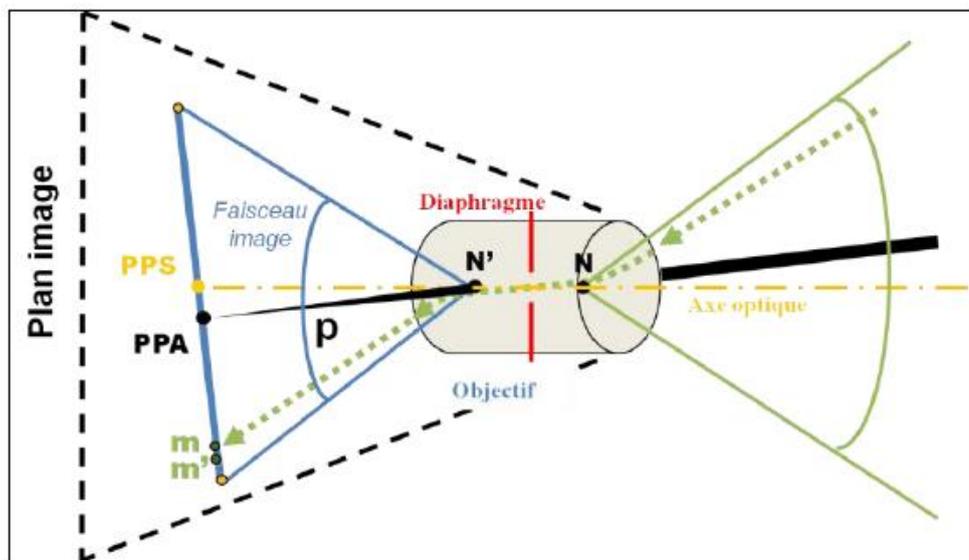


Figure 21 : Géométrie des différents paramètres internes de l'appareil photographique. [12]

- La distance focale ;
- Les coordonnées du PPS (Point Principal de Symétrie) dans le repère de l'image ;
- Les coordonnées du PPA (Point Principal d'Autocollimation) dans le repère de l'image ;
- Les coefficients du polynôme modélisant la distorsion.

1.1.2. Les paramètres externes :

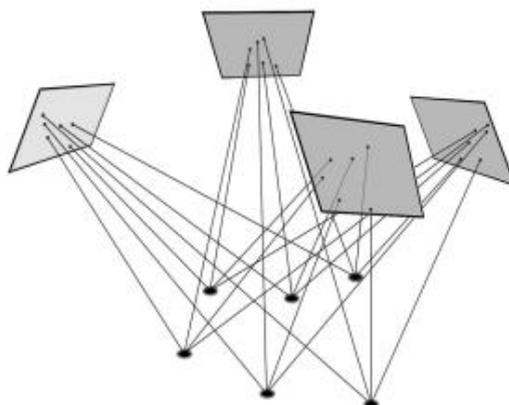


Figure 22 : Prises de vues de différentes positions et différents angles. [62]

- La position d'acquisition.
- L'angle de prises de vues.

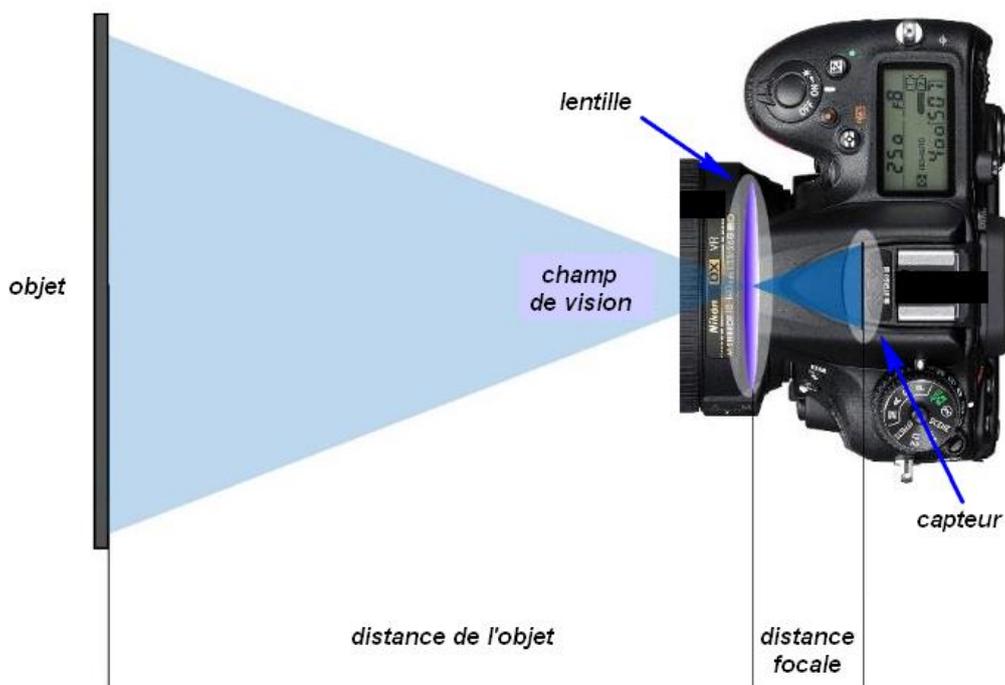


Figure 23 : les paramètres interne et externe de la caméra. [17]

1.3. Le calibrage de l'appareil :

La détermination des paramètres internes a été effectuée en utilisant deux procédures différentes. Dans les 30 premières déterminations, la routine du **Photomodeller** « Camera Calibration Project » a été utilisée. Dans cette approche, en supposant que le champ de test est plat et que les points sont régulièrement distribués, les coordonnées des points pourraient être considérées comme « connues » selon un système de référence arbitraire. Une fois les coordonnées cibles établies, elles peuvent être utilisées comme points de contrôle et ces informations sont entrées dans l'ajustement du faisceau. Cette méthode pourrait être considérée comme un hybride entre l'auto-étalonnage et l'étalonnage sur le terrain, selon la nomenclature scientifique la plus répandue. Dans chacun des 30 premiers étalonnages, 15 images convergentes ont été prises à partir de cinq stations de caméra. À chaque station, des images supplémentaires ont été acquises avec la caméra tournée autour de son axe optique

de 90° et -90°, adoptant la stratégie orthogonale habituelle pour minimiser la corrélation des paramètres. [18]

Dans les étalonnages 31 à 34, les cibles n'étaient pas réparties uniformément et ne pouvaient donc pas être utilisées comme points de contrôle. Dans ce cas, l'approche de la procédure d'étalonnage adoptée dans le photomodeller est appelée « étalonnage plein champ ». Selon la terminologie scientifique la plus répandue, cette méthode doit être considérée comme un « auto-étalonnage ». Dans chacun des quatre étalonnages, 15 images convergentes ont été acquises à partir de cinq stations de caméras. À chaque station, la caméra a de nouveau été tournée autour de son axe optique de 0°, 90° et -90°. [18]

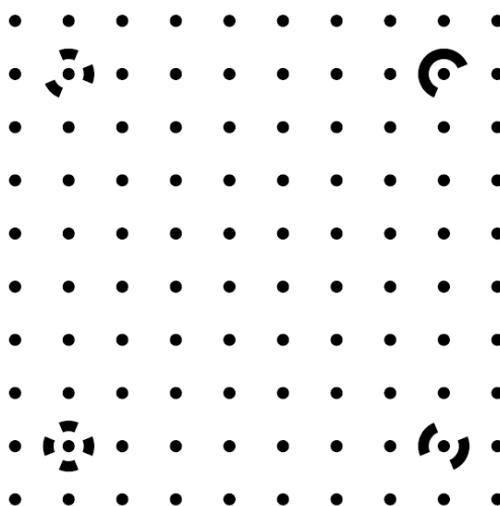


Figure 24 : Photo Modeler Calibration Grid.
[61]

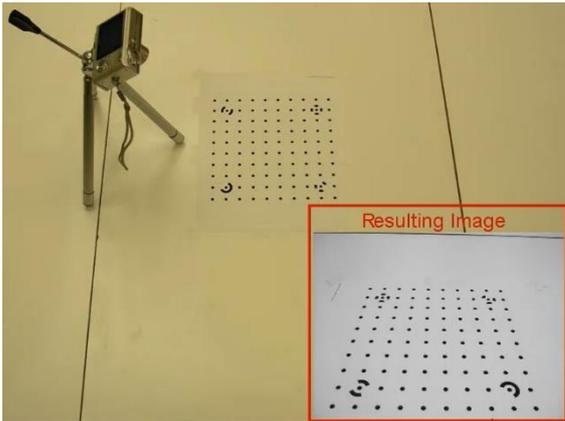


Figure 28 : La première capture à 90°. [60]

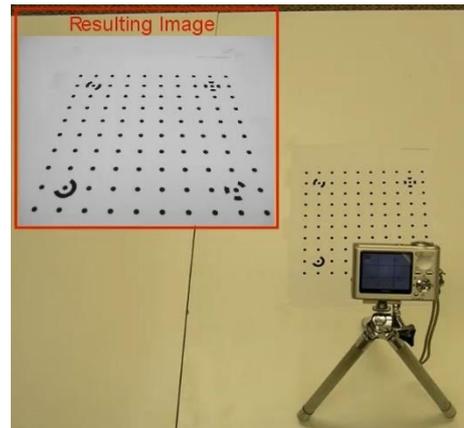


Figure 26 : La deuxième capture à 0°. [60]

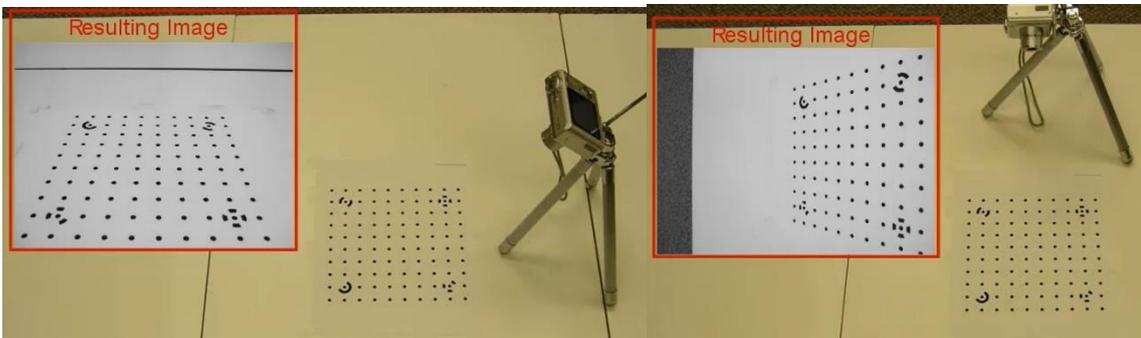
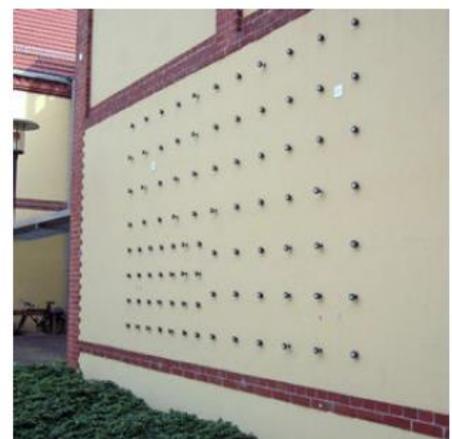


Figure 27 : La troisième capture à -90°. [60] Figure 25 : La quatrième capture à 180°. [60]

Calibrage dans le champ d'essai :



a) Terrain de test mobile



b) Champ d'essai stationnaire sur un mur

Figure 29 : Exemples de champs de test photogrammétriques. [12]

L'étalonnage du champ d'essai est basé sur un champ ciblé approprié de points d'objet avec des coordonnées ou des distances éventuellement connues. Ce champ de test est imagé à partir de plusieurs stations de caméras, assurant de bonnes intersections de rayons et remplissant le format de l'image. Les champs de test peuvent être mobiles (Figure 29a) ou stationnaire (Figure 29b). [12]

1.4. Les points de calage :

Dans de nombreuses applications, les emplacements à mesurer sur un objet doivent être marqués avec des cibles artificielles, par ex.

- Pour identifier les points caractéristiques des objets naturels qui ne peuvent autrement être identifiés avec précision,
- Comme points uniquement définis pour les mesures comparatives,
- Comme points de contrôle pour la mesure géodésique,
- Pour l'identification et la mesure automatiques des points,
- Pour l'amélioration de la précision.

La taille physique et le type de cible à utiliser dépendent de la configuration d'imagerie choisie (stations de caméra et directions de visualisation, échelle de l'image, résolution) et de l'éclairage (source lumineuse, direction d'éclairage). La fabrication de très petites cibles et la logistique de très grandes cibles peuvent être prohibitives ; et on peut les diviser comme suit :

Cibles rétro-réfléchissantes :

Les cibles rétro-réfléchissantes (rétro-cibles) sont largement utilisées dans la pratique, en particulier dans les applications industrielles. Ils sont constitués d'un matériau rétro-réfléchissant qui est soit recouvert d'un masque à motif noir, soit estampé dans la forme de la cible. Les rétro-cibles sont généralement de forme circulaire, mais elles peuvent être fabriquées dans n'importe quelle taille et forme (exemples sur la Figure 30). [12]

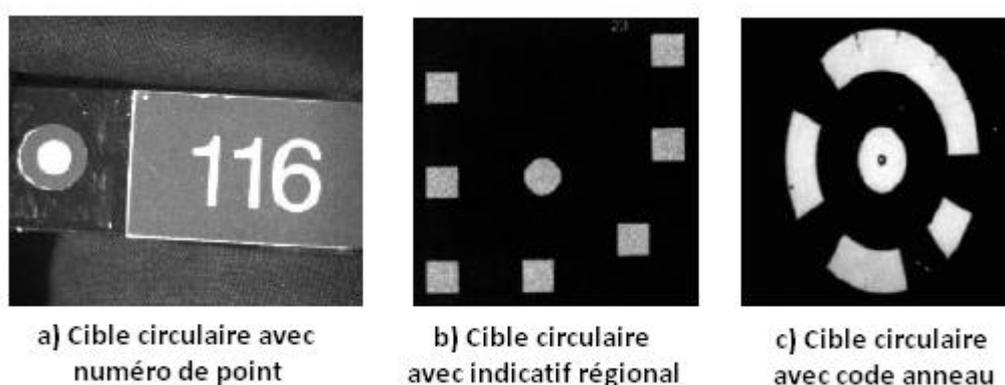


Figure 30 : Exemples de cibles rétro-réfléchissantes. [12]

Cibles circulaires

En raison de leur forme radialement symétrique, les cibles circulaires sont très appropriées pour représenter un point cible (le centre) par une surface.



Figure 31 : Exemples de cibles circulaires artificielles. [12]

Les cibles sphériques :

Les cibles sphériques présentent les avantages suivants par rapport aux cibles plates :

- Les cibles sphériques sont toujours imagées comme une ellipse avec une excentricité radiale autour de l'axe optique ;
- Les cibles sphériques peuvent être vues de manière cohérente sur une plage angulaire beaucoup plus large ;
- Les sphères peuvent être utilisées comme palpeurs.



Figure 32 : Application de cibles sphériques. [12]

Cibles à motifs :

Certaines applications utilisent des cibles où le point cible est défini par l'intersection de deux lignes. Les cibles en forme de croix, en damier et sectorisées en sont des exemples. Leur avantage est la définition directe d'un point central à l'aide d'arêtes bien définies et leur bonne séparation de l'arrière-plan. Un inconvénient est le plus grand effort pour localiser le centre à l'aide de méthodes numériques et, par rapport aux cibles circulaires, la plus grande dépendance à l'angle de rotation.

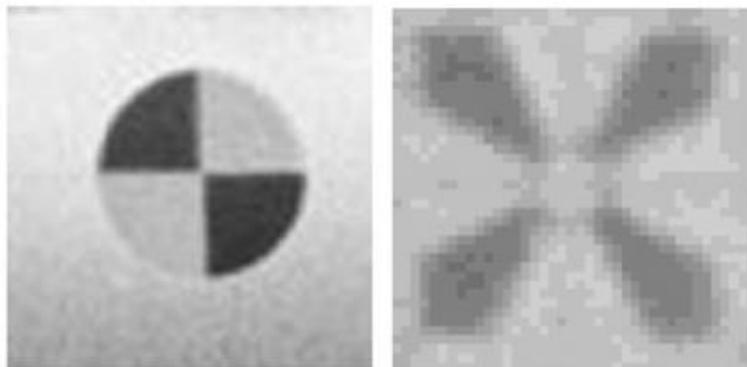


Figure 33 : Exemples de cibles de motif de ligne. [12]

Cibles codées :

Les cibles avec un modèle supplémentaire qui code un numéro d'identification de point individuel peuvent être utilisées pour automatiser l'identification de point. Les codes, comme les codes-barres des produits, sont disposés en lignes, en anneaux ou en régions autour du point cible central. Des modèles peuvent être conçus qui codent plus de plusieurs centaines de numéros d'identification ponctuels. Les cibles codées doivent répondre aux exigences suivantes :

- Invariance par rapport à la position, la rotation et la taille.
- Invariance par rapport à la perspective ou distorsion affine.
- Décodage robuste avec détection d'erreur (même avec des occlusions partielles).
- Centre précisément défini et identifiable.
- Nombre suffisant de numéros d'identification de points différents.
- Motif détectable dans n'importe quelle image.
- Temps de traitement rapides pour la reconnaissance des formes.
- Taille minimale du motif.
- Faibles coûts de production.

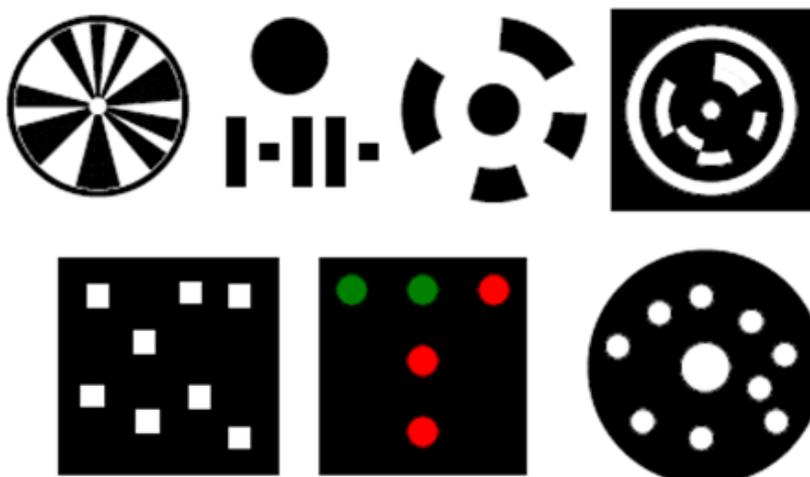


Figure 34 : Sélection des cibles codées

Rangée supérieure : modèles de codes à barres, Rangée inférieure : motifs de forme et de couleur. [12]

Les sondes et dispositifs points cachés :

Des dispositifs de palpation ciblés ont été développés pour mesurer des zones « cachées » sur un objet qui ne sont pas directement visibles par le système de caméra, bien qu'il soit également pratique de les utiliser pour des mesures générales. [12]

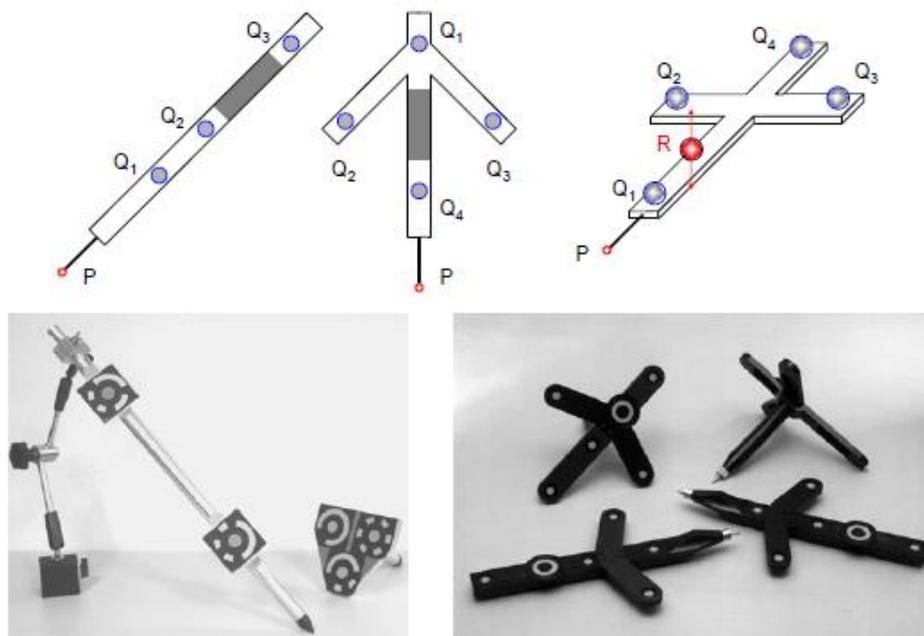


Figure 35 : Principe et exemples de sondes de mesure ciblées. [12]

Principe d'un adaptateur pour la mesure indirecte du centre d'un trou percé. La cible visible est montée de telle sorte que le point mesuré Q soit situé sur l'axe de forage à un décalage connu d par rapport au centre du trou P. [12]

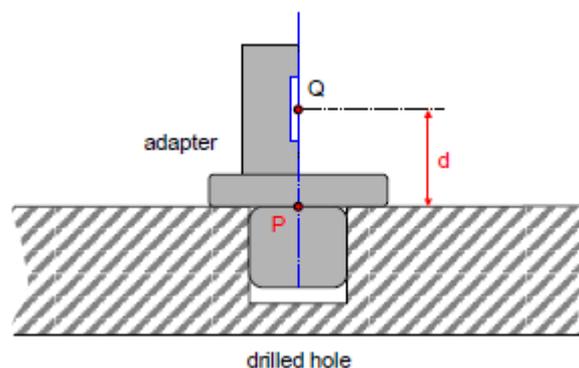


Figure 36 : Principe de l'adaptateur pour la mesure des trous percés. [12]

Cible codée sur chacune des 5 faces, ainsi qu'un point de mesure ou une arête sur le sixième côté. Les points des cibles codées et le point de mesure sont fabriqués pour avoir une précision

relative des coordonnées de référence d'environ 10 μm . En mesurant les points automatiquement et en analysant les distances spatiales entre eux, un cube particulier peut être identifié et son point de mesure localisé en 3D. [12]



Figure 37 : Cubes d'adaptateur AICON. [12]

2. La différence entre la photo et la carte :

2.1. Définition du pixel :

Le pixel est une unité de mesure de la définition d'une image numérique. Abrégée en px, elle est souvent présentée comme un petit carré de couleur. Lorsqu'on zoome sur une image numérique matricielle (les images vectorielles ne sont pas basées sur les pixels), on aperçoit en effet que celle-ci se compose d'une multitude de petits carrés colorés. Il s'agit des pixels. À noter qu'il n'existe pas de plus petit élément d'une surface d'affichage que le pixel.[19]

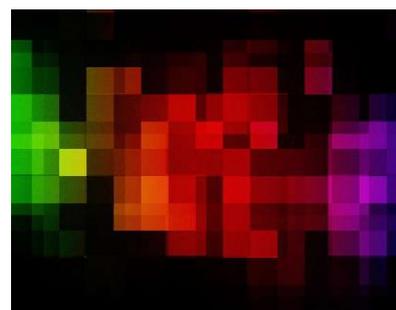


Figure 38 : les pixels d'image. [20]

Le pixel correspond donc à un point de nuance de couleur qui, assemblé à beaucoup d'autres, forme une image dite matricielle.[20]

Le plus petit élément constitutif d'une image produite ou traitée électroniquement, définie par sa couleur et sa luminosité.[21]

Point élémentaire d'une image numérisée. Un pixel peut être représenté par un seul bit (noir ou blanc) ou plus souvent par 8, 16, voire 32 bits (qui peuvent contenir des informations sur la couleur, la texture, la transparence, etc.). [20]

Dans le monde du multimédia et de la photographie numérique, le pixel renseigne les consommateurs sur la qualité d'affichage d'une image. Plus son nombre est élevé, meilleure est la qualité de cette image. Cela a notamment une influence sur le choix d'un écran (télévision, ordinateur, tablette numérique, smartphone, etc.). On associe alors généralement le terme à celui de définition (c'est le nombre de pixels qui composent une image) et de résolution (nombre de pixels par unité de mesure).[19]

2.2. La différence :

Carte :

- Projection orthogonale.
- Échelle uniforme.
- Relief de terrain sans distorsion (lignes de contour).
- Une représentation abstraite
- Représentation géométriquement correcte
- Les éléments semblent déplacés dans sa position réelle et sous différentes formes, en raison du processus de généralisation.

Photo :

- Projection de perspective centrale
- Échelles variables.
- Déplacement de secours dans l'image
- Les objets semblent déplacés en raison de distorsions géométriques.
- Seuls les objets visibles.
- Est une représentation réelle de la surface de la terre, aucune légende nécessaire.
- Représentation géométriquement pas correcte

	<i>Photo</i>	<i>Carte</i>	<i>Tâche</i>
Projection	Centrale	Orthogonale	Transformations
Données	≈ 0.5 GB	Peu KB	Identification des fonctionnalités et extraction de fonctionnalités
Informations	Explicite	Implicite	

Tableau 1 : Différences entre les photographies et les cartes.

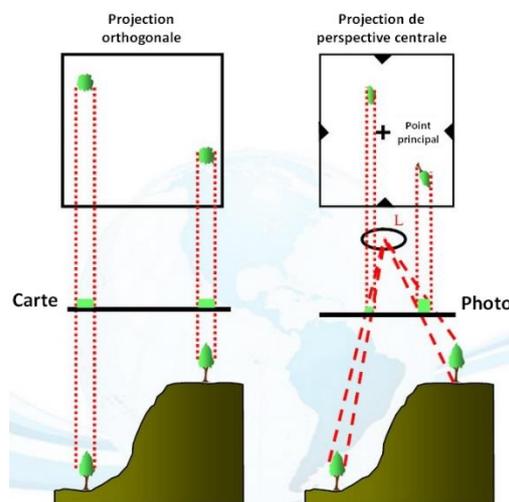


Figure 39 : Géométrie de la carte et de la photo.[56]

3. Les défit de la conversion pour avoir une photo mesurable

3.1. Le phénomène de perspective :

La perspective fait référence au phénomène visuel où les objets les plus proches de nous semblent plus grands et ceux qui sont plus éloignés de nous semblent plus petits. En photographie, il est influencé par 3 facteurs : la longueur focale, la distance de prise de vue et l'angle de prise de vue. [22]



Figure 40 : Exemple d'image en perspective.[22]

La caméra dite en perspective, qui a un seul centre de projection et capte la lumière sur un plan de capteur plat. Il convient cependant de souligner que le modèle est valable pour toutes les caméras avec un seul centre de projection (ne remplaçant de manière appropriée que la cartographie des points d'image aux rayons dans l'espace), et des extensions existent pour des projections non centrales le long de rayons droits. [23]

Trois systèmes de coordonnées sont nécessaires pour décrire une caméra en perspective Figure 41 :

- Le système de coordonnées d'objets 3D.
- Le système de coordonnées de la caméra, qui est un autre système de coordonnées 3D, attaché à la caméra de telle sorte que son origine se trouve au centre de projection et que le plan du capteur soit parallèle à son plan xy et déplacé dans la direction z positive.
- Le système de coordonnées d'image 2D dans le plan du capteur ; son origine se trouve dans le coin supérieur gauche de l'image, et ses axes x et y sont parallèles à ceux du système de coordonnées de la caméra ; pour les appareils photo numériques, il est pratique d'aligner également l'axe x avec les rangées du réseau de capteurs.

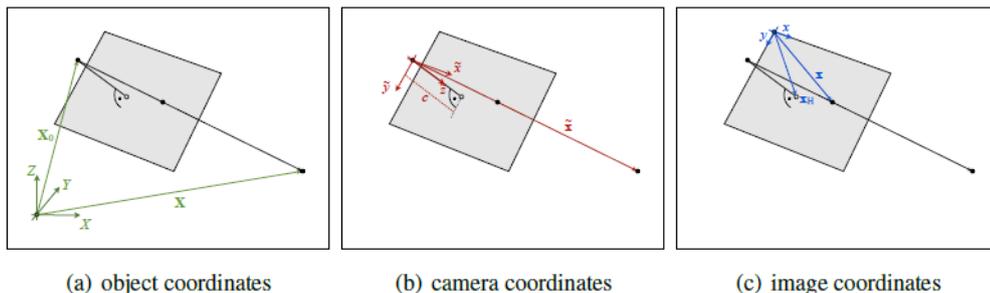


Figure 41 : Systèmes de coordonnées: X sont les coordonnées d'objet 3D d'un point; les coordonnées de la caméra 3D du même point sont x ; les coordonnées de l'image 2D de sa projection sont x .[23]

Les paramètres d'orientation intérieure d'une caméra définissent la position spatiale du centre de perspective.[12]

Mathématiquement, le centre de la perspective est défini par le point par lequel passent tous les rayons d'image en ligne droite.[12]

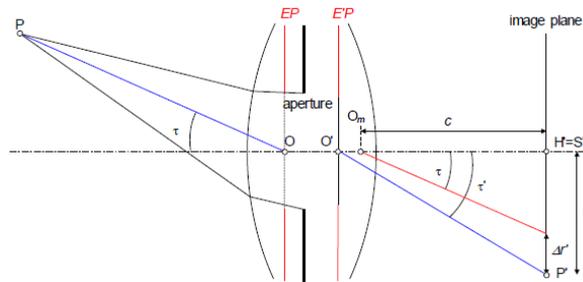


Figure 42 : Centres de perspective O , O' et distance principale c (d'après Kraus 1994).[12]

3.2. Le phénomène de distorsion :

En photographie, la distorsion est généralement appelée une aberration optique qui déforme et plie les lignes physiquement droites et les fait apparaître courbes dans les images, c'est pourquoi une telle distorsion est également communément appelée « curviligne ». La distorsion optique se produit à la suite de la conception optique, lorsque des lentilles spéciales sont utilisées pour réduire les aberrations sphériques et autres. En bref, la distorsion optique est une erreur d'objectif.[24]

Il existe trois types connus de distorsion optique : le baril, le coussin et la moustache / moustache (également appelés ondulés et complexes). Nous allons d'abord voir un objectif sans distorsion.

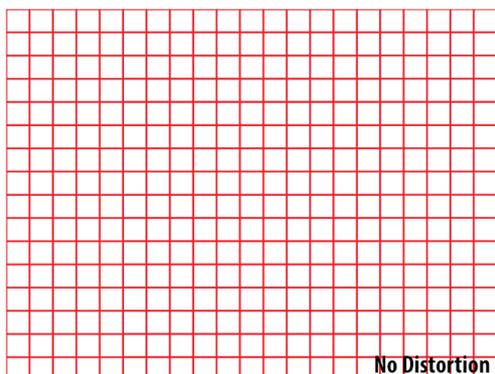


Figure 44 : un objectif sans distorsion. [24]

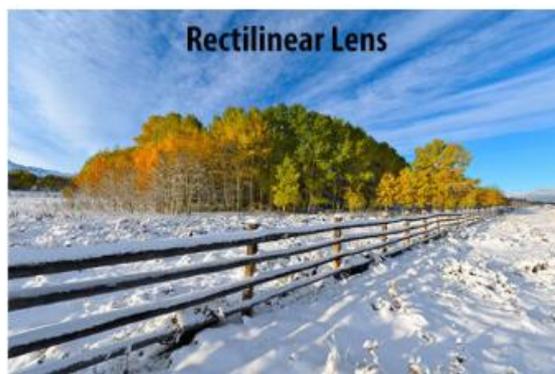


Figure 43 : image sans distorsion. [24]

Distorsion en barillet :

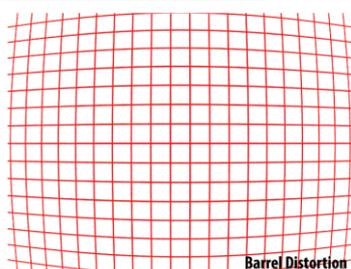


Figure 45 : Exemple de distorsion en barillet. [24]

Distorsion en moustache :

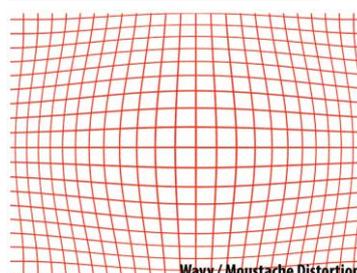


Figure 47 : Exemple de distorsion en moustache. [24]

Distorsion en coussinet :

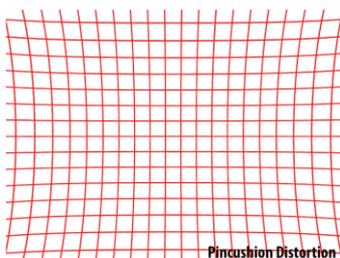


Figure 46 : Exemple de distorsion en coussinet. [24]

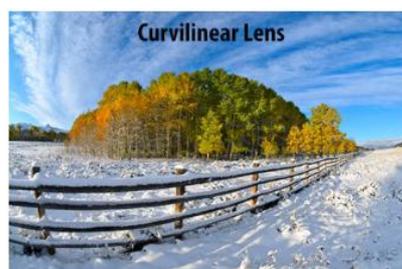


Figure 48 : image avec distorsion. [24]

3.3. La géométrie de la scène :

Description de scène basée sur le terrain :

Selon l'objectif du spectateur, une scène peut être décrite de différentes manières.

Prenons l'exemple d'un physicien : il ou elle peut décrire la scène comme une fonction dans l'espace en spécifiant le matériau et ses propriétés. La surface d'un objet, par exemple un bâtiment, est supposée être la transition entre le matériau solide et l'air. La limite entre deux parties de surface, disons deux parties du toit, est considérée comme la transition d'une propriété de surface éventuellement purement géométrique, par exemple la normale. Cette vue peut être considérée comme une description de la scène basée sur le champ, car l'espace et éventuellement les coordonnées temporelles sont essentielles pour traiter les propriétés de la scène. La notion se transfère aux cartes matricielles sémantiques, par exemple, lors de la fourniture de la couverture terrestre dérivée d'une image de télédétection. [25]

Description de scène basée sur des objets :

L'agrégation de matériaux ayant les mêmes propriétés, par exemple la densité ou la vitesse du matériau, conduit à une partition complète de la scène en un ensemble de régions dont l'étendue spatiale peut être décrite par la forme de leur frontière et éventuellement leur vitesse commune et dont les relations spatiales peuvent être utilisées pour décrire l'interaction avec d'autres régions. Le raisonnement sur ces régions et leurs relations est simplifié en les catégorisant et en leur donnant des noms. Cela peut être considéré comme une description basée sur des objets, car les objets sont des clés pour aborder le contenu de la scène. Cette vue en même temps peut délibérément négliger les propriétés physiques à l'intérieur des régions ou des objets. [25]

Dans ce qui suit, nous limitons la discussion aux scènes qui peuvent être représentées comme :

- Un ensemble de points 3D et un ensemble de segments de ligne droite 3D (une description basée sur un objet) lors de l'exécution de tâches d'orientation et
- Un ensemble de régions lisses ou de surfaces lisses par morceaux (une description basée sur le champ) lors de la reconstruction de surface.

Ainsi, la description de la scène peut être très clairsemée par rapport à la perception humaine.

Un ensemble de points 3D est le modèle de scène de base utilisé dans l'ajustement de groupe. Il vise à récupérer simultanément la scène et les caméras, dans la communauté de la vision par ordinateur appelée structure et mouvement. Si les points 3D sont représentatifs d'une surface lisse, un ensemble d'éléments de surface, appelés surfels, constitué d'un point 3D et de la normale de surface correspondante, peut également être utile. [25]

Les objets créés par l'homme sont souvent représentés sous la forme d'un polyèdre, constitué d'un ensemble de points 3D, de segments de ligne 3D et de régions planes, voir Figure 49, à gauche. En raison d'occlusions, le polyèdre peut ne pas être fermé ou connecté. Dans ce cas, la surface est incomplètement décrite par un ensemble de patchs polyédriques. Souvent, seul un ensemble d'un type, par exemple des régions planes, est utilisé pour décrire la scène. [25]

Modèle de frontière :

En général, les limites d'objets réels peuvent être représentées comme des surfaces lisses par morceaux avec des régions lisses ayant des limites lisses par morceaux. Comme les surfaces

réelles sont rugueuses, comprenant éventuellement des parties fractionnaires, nous supposons que la représentation de la surface se rapporte à une certaine échelle, par exemple, à la résolution d'un maillage, où les détails de surface plus petits que le maillage ne sont pas pertinents et donc lissés par l'observation. Et les processus de reconstruction. Cela inclut les polyèdres comme cas particuliers. Cependant, cela permet à la frontière entre deux régions lisses de varier entre net et lisse, voir Figure 49, à droite. [25]



Figure 49 : Modèle de ville représenté sous forme de polyèdre. À droite : la surface avec trois régions, la région \mathcal{R}_1 et la région \mathcal{R}_2 sont séparées par la limite B_{12} , qui n'est que partiellement nette. [25]

4. La vision stéréoscopique

La stéréoscopie est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Elle se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule image à partir des deux images planes et différentes provenant de chaque œil.

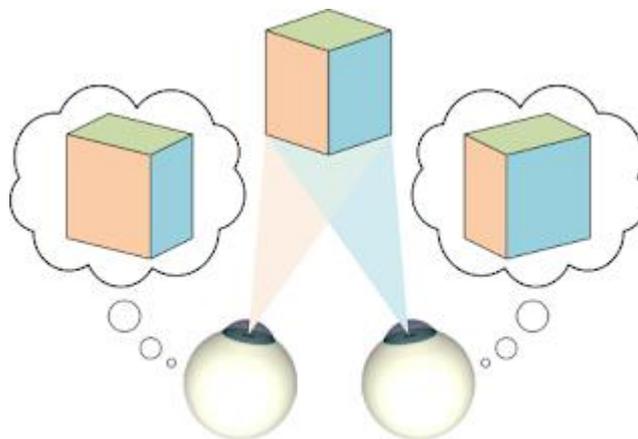


Figure 50 : principe de la vision stéréoscopique. [26]

Il existe, pour réaliser ces images, aussi bien que pour les observer, une grande variété de moyens, à la description desquels plusieurs centaines de livres ont été consacrés.

4.1. Principe de recouvrement stéréoscopique :

4.1.1. Correspondances stéréoscopiques :

Le traitement photogrammétrique d'une image a une signification particulière. Pour bien comprendre, deux images d'un objet, prises à partir de positions différentes, représentent la condition minimale nécessaire à une mesure d'objet 3D. Ensuite, nous avons l'effet de la vision humaine qui est très développé et qui permet la visualisation stéréoscopique et l'analyse précise des images. [12]

Le processus d'évaluation des images stéréo est généralement divisé en trois étapes :

Première étape : Détermination des caractéristiques d'images homologues (comme titre d'exemple : les points correspondants dans les deux images). [12]

Deuxième étape : Orientation de la paire d'image (également avec le calibrage des caméras). [12]

Troisième étape : Mesure des objets en utilisant le facteur tridimensionnel 3D (par exemple : la mesure des surfaces de formes libres). [12]

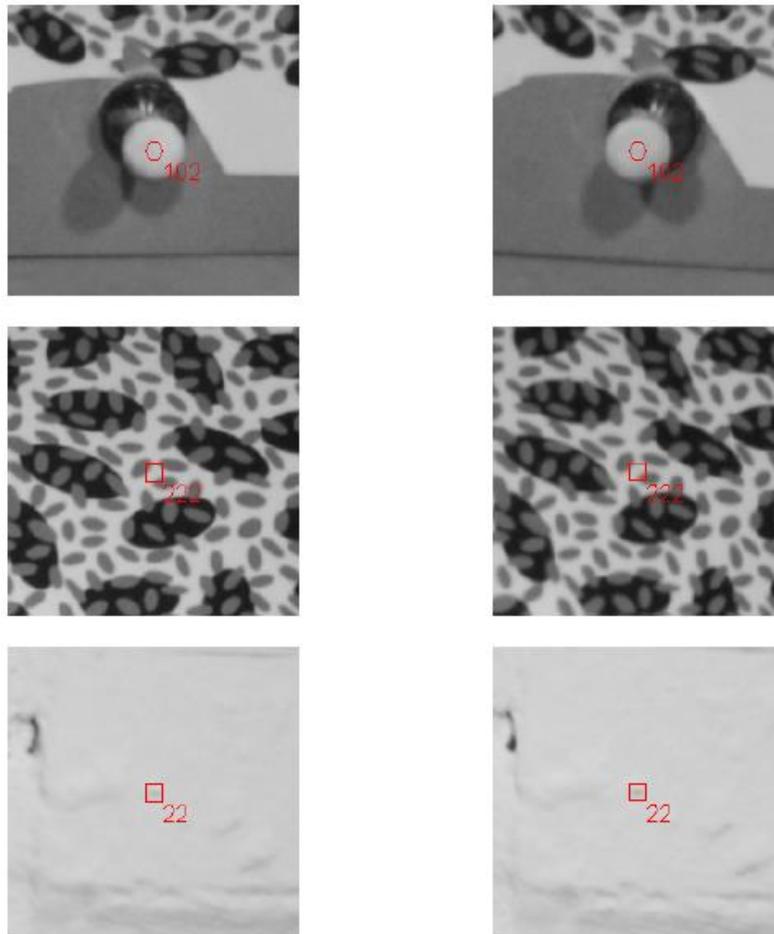


Figure 51 : Problème de correspondance résultant de différents motifs de surface d'objet dans une image stereo. [12]

4.1.2. Les points d'attache :

Les points de liaison sont mesurés, des points homologues dans les images, c'est-à-dire qu'ils représentent le même point d'objet. [12]

Ces points de liaison aident à la connexion géométrique entre deux images ou plus et n'ont pas besoin d'être des points de référence. Plus précisément, ils doivent être sélectionnés pour couvrir une zone suffisante dans l'espace image et objet afin de fournir une connexion robuste entre les images. [12]

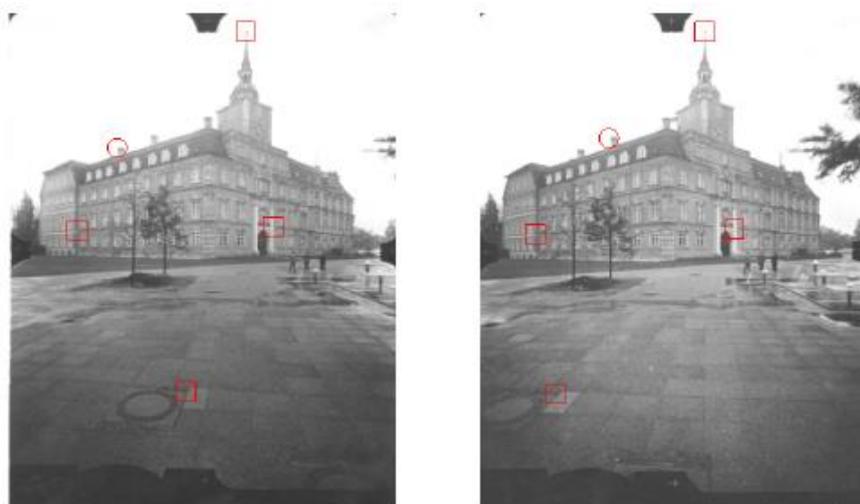


Figure 52 : points dégalité dans une paire stéréo. □: points correctement appariés. ○: points mal appariés. [12]

4.1.3. Orientation des paires d'images stéréo :

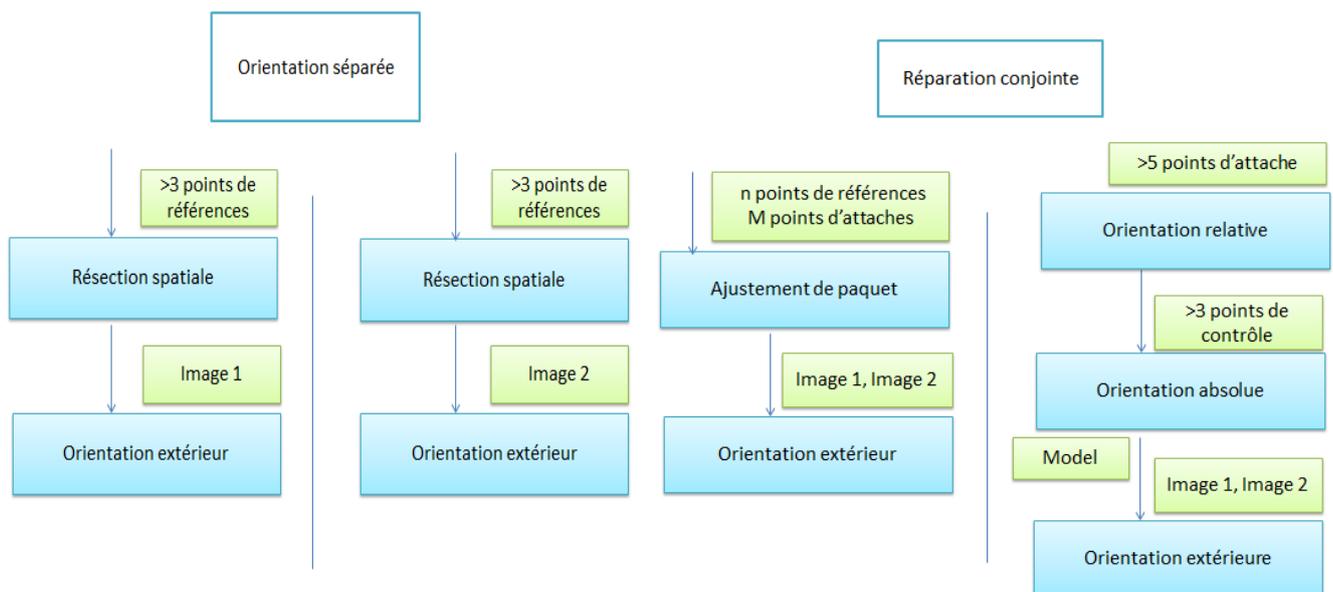


Figure 53 : Méthodes d'orientation pour les images stéréo

4.1.4. Cas normal de la photogrammétrie stéréo :

Le cas normal de la photogrammétrie stéréo est, en fait, le cas particulier dans lequel des caméras idéales identiques ont des axes parallèles pointant dans la même direction à angle droit par rapport à la base stéréo. [12]

En ce qui concerne un système de coordonnées XYZ situé au centre de la perspective gauche, les coordonnées de l'objet peuvent être dérivées des rapports indiqués sur la Figure 54. En utilisant des caméras réelles, le cas normal ne peut être obtenu qu'avec des exigences de précision faibles. [12]

Son utilisation est principalement dans le calcul des coordonnées approximatives et l'estimation de la précision de mesure réalisable.

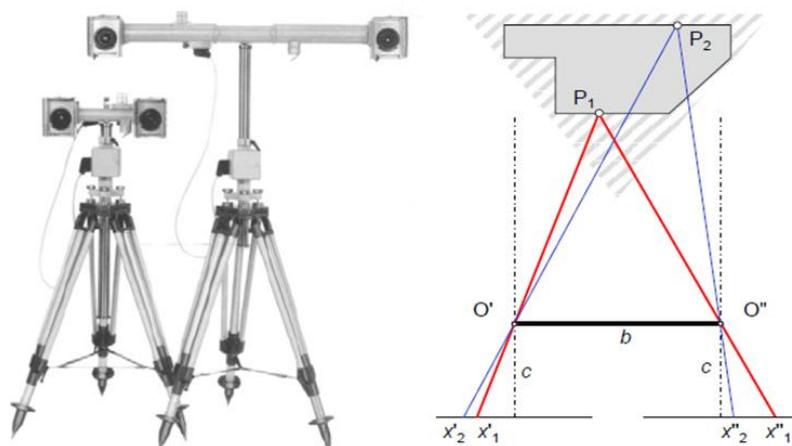


Figure 54 : cas normal de la photogrammétrie stéréo. [12]

4.2. Recouvrement :

Pour le recouvrement dans la photogrammétrie aérien Une bande de photographies est constituée d'images capturées le long d'une ligne de vol, normalement avec un chevauchement de 60%. Toutes les photos de la bande sont supposées être prises à peu près à la même hauteur de vol et à une distance constante entre les stations d'exposition. L'inclinaison de la caméra par rapport à la verticale est supposée minimale.[27]

Les photographies de plusieurs trajectoires de vol peuvent être combinées pour former un bloc de photographies. Un bloc de photographies se compose d'un certain nombre de bandes parallèles, normalement avec un écart de 20 à 30%. Les techniques de triangulation par blocs sont utilisées pour transformer toutes les images d'un bloc et leurs points de masse associés en un système de coordonnées homologues. [27]

Un bloc régulier de photos est généralement un bloc rectangulaire dans lequel le nombre de photos dans chaque bande est le même. La Figure 55 montre un bloc de 4×2 photographies. La Figure 56 illustre deux images qui se chevauchent. [27]

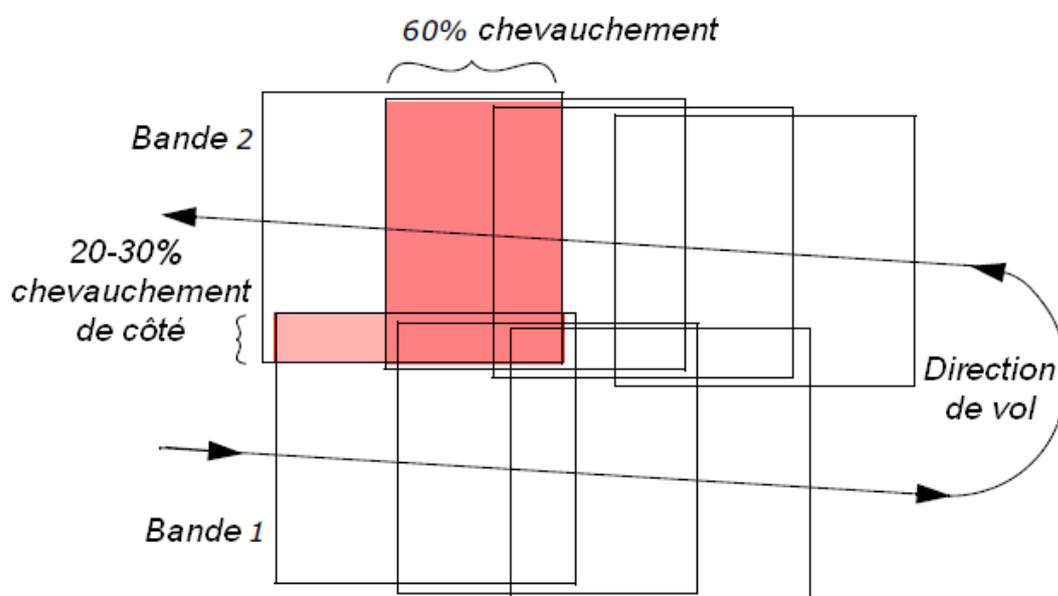


Figure 55 : Un bloc rectangulaire régulier de photos aériennes. [27]

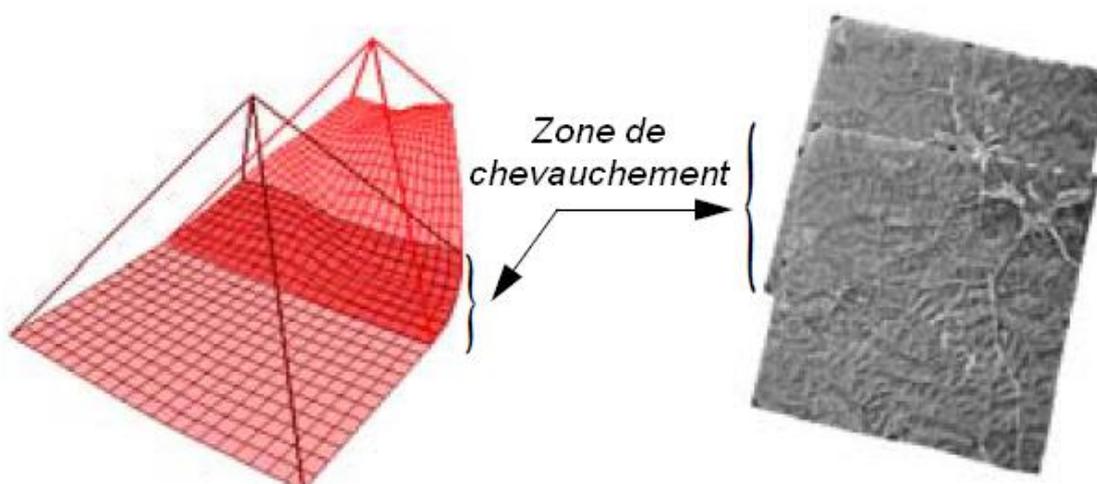


Figure 56 : Images superposées. [27]

On peut définir le **principe de recouvrement dans la photogrammétrie terrestre** comme suit :

Chaque partie de la scène qu'on va photographier, va apparaître dans au moins trois vues distinctes prises à partir d'endroits différents, car il s'agit d'une exigence qui va nous permettre probablement d'améliorer les résultats finals.

Il s'agit aussi de limiter les angles entre les photos, ça veut dire que lorsqu'on se déplace autour des objets, on essaye de garder un angle très bas entre chaque photo.

D'après logicielle zephyr nous avons conclu que :

- Lors de l'utilisation du logiciel Zephyr dans une application de photogrammétrie aérienne (UAV), il est très probable qu'on va implémenter déjà une procédure standard avec (au moins) 60% de chevauchement vers l'avant et (au moins) 30% de chevauchement latéral. [28]
- Si on utilise le logiciel Zephyr pour capturer un objet en se déplaçant autour de lui (comme une statue), on suggère de prendre plusieurs orbites autour de l'objet à différentes hauteurs. Cela peut en effet être considéré comme un cas particulier de l'application de photogrammétrie aérienne, où l'orbite joue le rôle de la bande. Si l'acquisition suit une planification stricte, on peut appliquer les mêmes règles que dans le cas aérien. Sinon, en règle générale, 3 orbites de 24 images chacune suffiront généralement. [28]
- Si on utilise le logiciel Zephyr dans un scénario urbain (comme un carré ou à l'intérieur d'une salle), il est préférable de choisir 2 ou 3 spots dans le carré et prendre une séquence panoramique de photos de chaque spot (en assurant le chevauchement habituel de 60%). [28]
- Il faut balayer ensuite toutes les façades (ou murs) à une distance qui permet d'encadrer toute la hauteur de la façade, et avec un chevauchement latéral de 60%. Et pour une résolution plus élevée, on peut effectuer plusieurs balayages en gros plan, en veillant à couvrir (avec chevauchement) toute la hauteur de la façade. [28]

4.3. Configuration des points de calage :

Les cibles peuvent vous aider dans pratiquement tous les projets. La plupart des projets PhotoModeler nécessitent la résolution de la géométrie de base des stations de caméra (appelée orientation) et les cibles fournissent un moyen très rapide de le faire. [29]

Les points cibles sont utilisés dans toute application où des points 3D de haute précision sont nécessaires et qu'elles sont placées dans la scène avant la photographie. Dans ces applications, vous pouvez encore automatiser et accélérer ces projets en utilisant des cibles codées. [29]

On introduit des cibles artificielles dans la scène ou sur l'objet mesure dans les cas suivants :

- Lorsque les entités de l'objet ne sont pas identifiables dans les photos. [30]
- Pour pouvoir automatiser l'identification des points dans les images. [30]
- Pour diminuer l'incertitude de mesure. [30]

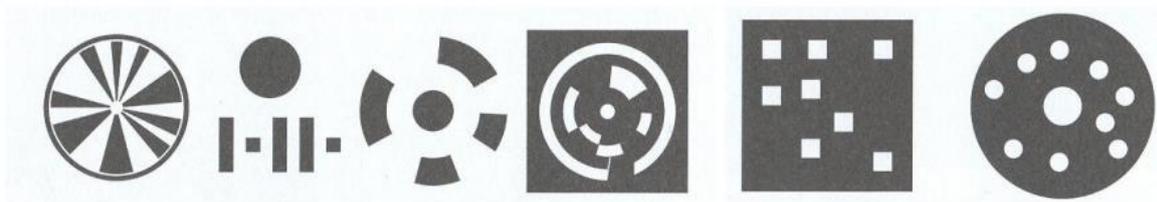


Figure 57 : Différents codages des cibles. [30]

Les cibles marquées doivent être mises en correspondance. Supposons que ces cibles soient vues dans toutes les images, leur appariement se fait dans la plupart des cas par une corrélation de voisinage des points entre les images (avoir un recouvrement supérieur à 60% entre les photos pour que les cibles soient apparues sur eux). [30]

A partir de la connaissance des paramètres des modèles géométriques interne et externe, comme dans un capteur stéréoscopique, la recherche d'un point correspondant se limite à la recherche sur une droite (Figure 58). La matrice dite fondamentale établit une relation directe entre les points d'un plan image et les points de l'autre, de manière à avoir un plan passant par les deux centres optiques C1 et C2 et le

point P_1 dans l'image I_1 . Ce plan intersecte le plan image I_2 avec une droite L qui contient le point P_2 homologue au point P_1 . [30]

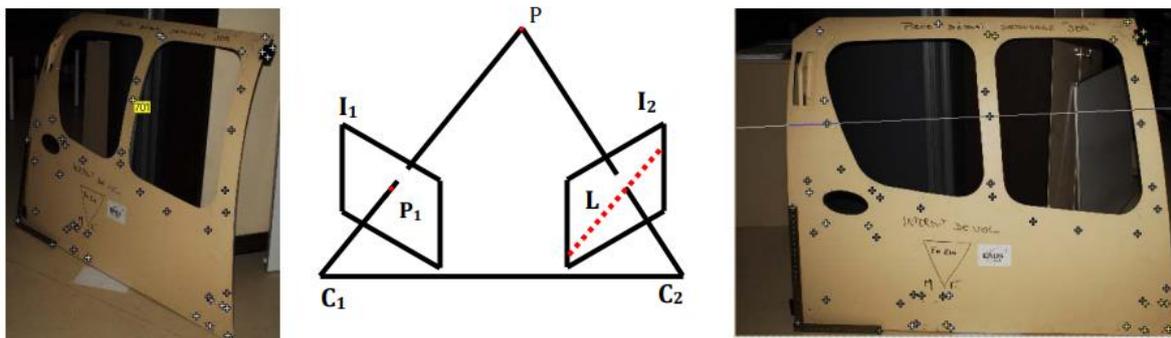


Figure 58 : Appariement des cibles. [30]

4.4. La reconstituons par triangulation :

Les points visibles sur les images sont les projections des points réels qu'on peut alors situer sur des droites. Si deux ou plusieurs vues de l'objet sont prises, la position dans l'espace des points réels peut alors être obtenue par intersection de ces droites : c'est le principe de triangulation fondamentale de toute reconstruction 3D à partir d'images.

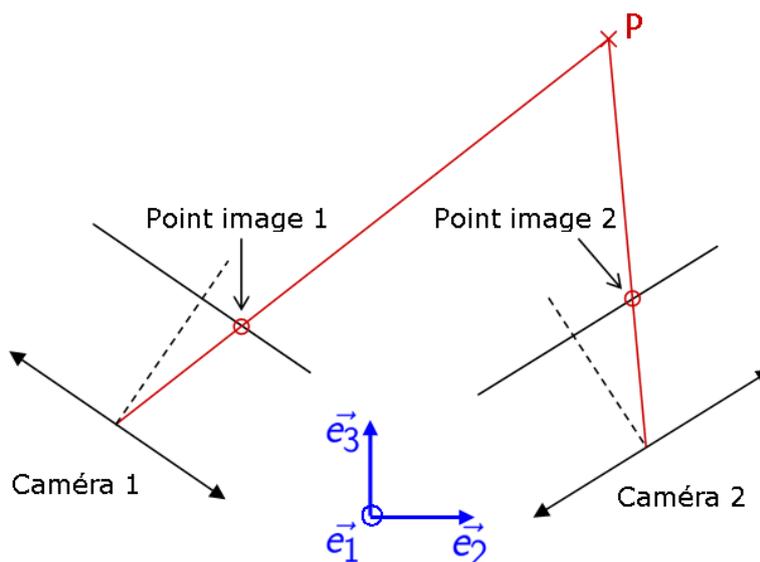


Figure 59 : principe de triangulation.

La technique de triangulation :

- Photogrammétrie (imagerie simple, stéréo).
- Système de mesure d'angle (théodolites).
- GPS intérieur.
- Lumière structurée (procédures de coupe de lumière, projection de franges, mesure de phase, topographie moirée).
- Méthodes de mise au point.
- Méthodes d'ombre.
- Etc. ...

4.5. MNT et Ortho-photo plan

Le **MNT** est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation.

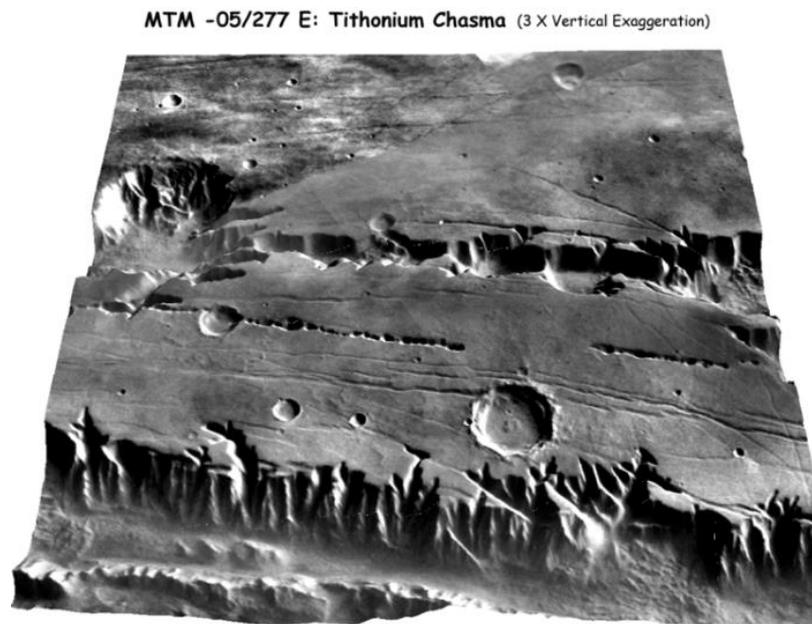


Figure 60 : Rendu en 3D d'un MNT.[31]

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- Maillage carré/rectangulaire.
- Maillage hexagonal.
- Maillage triangulaire régulier.
- Maillage triangulaire quelconque.

En fonction du type de maillage, la représentation informatique du MNT varie.

On peut déterminer automatiquement un modèle dense de l'objet par corrélation, et utiliser ce modèle soit pour une étude morphologique, calcul de pentes, de volumes, d'exposition..., soit pour rectifier les photographies et obtenir ainsi une ortho photo, assemblage d'images rectifiées en projection cartographique.

Les ortho photographies ou ortho images sont des images aériennes ou satellitaires de surface terrestre rectifiées géométriquement et égalisées radiométriquement. Ces images se présentant sous forme de dalles couvrant une zone de la terre peuvent être géo référencées dans n'importe quel système de coordonnées. Elles servent de fonds cartographiques dans les systèmes d'information géographique.



Figure 61 : exemple d'une ortho photo.[32]

La boucle de calcul de l'ortho photo est la suivante : chaque pixel de l'ortho photo à calculer reçoit une altitude par l'intermédiaire du modèle numérique. Ce point est projeté par les formules d'image sur les différentes photographies du chantier. Les radiométries y sont alors prélevées et combinées (par mélange, par choix d'une image préférentielle, ...). La radiométrie résultante sert alors à colorier le pixel de départ.

Dans le cas d'un objet tridimensionnel complexe (ortho photo urbaine vraie, et surtout ortho photo de prise de vues terrestre), il est nécessaire d'ajouter à ce processus des phases d'élimination des parties cachées, à la fois sur chaque photographie du chantier, et sur l'ortho photo résultante, ce qui complique considérablement l'opération.

5. La photogrammétrie terrestre est plus complexe que la photogrammétrie aérienne :

En ce qui concerne la photogrammétrie aérienne, elle permet d'obtenir des :

- Plans topographiques dont la précision dépendra de la hauteur du vol.
- Ortho plans ou des mosaïques numériques.

Ce type de photogrammétrie permet aux maitres d'ouvrage et aux prescripteurs d'appréhender globalement la zone à aménager ou à traiter.

Pour la photogrammétrie terrestre, elle :

- Nécessite des prises de vues.
- Se base sur des points de calage et géo référencement.
- Résulte de l'exploitation des prises de vues stéréoscopiques.

La photogrammétrie terrestre avait connu un développement assez important à la fin du 19^{ème} siècle, même si les applications restèrent limitées en France jusqu'aux années vingt. L'utilisation de prises de vue terrestres épargnaient les problèmes posés par l'aéronautique et rendaient moins cruciales les limites de la technique photographique, puisqu'il était possible d'employer de longs temps de pause et des focales moyennes à la distorsion mieux corrigées.

Mais la photogrammétrie terrestre souffrait aussi de restrictions sérieuses, en particulier, elle n'était efficace que dans les régions accidentées, ou le recours à des levés complémentaires à la planchette restait pourtant indispensable.

Chapitre 03 :
Etat de l'art de la
Photogrammétrie Terrestre

1. Logiciel :

1.1. Solutions web :

Ces solutions ont connu un énorme succès auprès du grand public de par leur facilité d'utilisation et leur gratuité.

Le principe repose sur le schéma suivant : un jeu de données photographiques est envoyé par l'utilisateur sur un serveur, tous les calculs dont ceux de corrélation automatique d'images sont réalisés sur ce serveur. Une fois reconstruite, la scène est retournée à l'utilisateur sous forme de nuage de points dense. Ces solutions intègrent des petites interfaces pour la visualisation de la scène et la navigation en 3D. Bien que gratuites, ces solutions web ne sont pas transparentes puisque les algorithmes de traitements ne sont pas libres d'accès. De ce fait, ces solutions peuvent parfois être classifiées de « boîtes noires ». La compréhension des paramètres mis en jeu dans les calculs n'est pas possible, ce qui rend délicat la compréhension des résultats infructueux.[11]

Quelques logicielles solution web :

- PhotoSynth, 2012 (Microsoft)
- 123DCatch, 2012 (Autodesk)
- Arc3D (groupe VISICS de l'Université Leuven en Belgique)

1.2. Les logiciels libres d'accès :

Ces solutions demeurent gratuites et les algorithmes de traitements sont en partie accessibles. Plus soucieuses de laisser l'utilisateur paramétrer ses calculs. [11]

Ces solutions s'adressent plus particulièrement à un public averti, appartenant à la communauté scientifique ou professionnelle. [11]

Ces solutions, très flexibles, manquent de rigueur dans la formulation des équations photogrammétriques, pouvant mener à des imprécisions inacceptables :

- L'orientation est fondée sur l'évaluation de la matrice fondamentale, conduisant à un sur-paramétrage (plus d'inconnues à déterminer). Ce système autorise chaque image à avoir sa propre distance focale, ce qui génère des imprécisions et des dérives.
- Les modèles de calibration proposés sont relativement simples, les coefficients de distorsions radiales étant souvent limités de 1 à 3. [11]

Quelques logiciels libres d'accès :

- Bundler, 2012
- PMVS, 2012
- Snavely et Al., 2008
- SFMToolkit, 2012
- VisualSFM, 2012
- Apero MicMac

1.3. Solutions commerciales :

Elles offrent de nombreuses possibilités de paramétrages et une chaîne de traitements complète et simplifiée par rapport aux solutions évoquées précédemment. Etant payants, les algorithmes de traitements ne sont pas libres d'accès ce qui rend la compréhension des calculs difficile. [11]

- PhotoModeler Scanner
- Z-Scan, 2012
- 3DF Zephyr
- Agisoft Photoscan Professional
- Bentley ContextCapture (Bentley, 2018)
- Pix4DMapper
- Autodesk ImageModeler
- D-Sculptor

1.4. Application mobile :

Les applis mobiles de modélisation 3D sont basées sur la photogrammétrie, une technologie de numérisation qui crée des modèles 3D à partir de photos 2D.

Il suffit de prendre plusieurs photos d'un objet sous différents angles, vous pouvez numériser en 3D des objets, des locaux. Les applications de la photogrammétrie pour smartphones sont moins précises que les applications d'ordinateur.

Nous présentons une liste complète des meilleures applications de modélisation 3D pour iPhone et smartphones Android.

Application	Pays	Prix	Système d'exploitation
3DSizeME	Canada	Gratuite	iOS
3D Creator	Suède	Gratuite	Android
Capture	États-Unis	Gratuite	iOS
Canvas	États-Unis	Gratuite	iOS (iPads uniquement)
itSeez3D	Russie	Gratuite	iOS (iPads uniquement)
Qlone	Israël	Gratuite	iOS
Scandy Pro	États-Unis	Gratuite	iOS (iPhone X)
Scann3D	Hongrie	Gratuite	Android

Tableau 2 : liste des meilleures applications mobile.[63]

2. Traitement de reconstitution :

La photogrammétrie englobe des méthodes de mesure et d'interprétation d'images afin de dériver la forme et l'emplacement d'un objet à partir d'une ou plusieurs photographies de cet objet. En principe, les méthodes photogrammétriques peuvent être appliquées dans toute situation où l'objet à mesurer peut-être enregistré photographiquement. Le but principal d'une mesure photogrammétrique est la reconstruction tridimensionnelle d'un objet sous forme numérique (coordonnées et éléments géométriques dérivés) ou sous forme graphique (images, dessins, cartes). La photographie ou l'image représente une réserve d'informations qui peut être consultée à tout moment.

Pour la reconstruction d'un objet à partir d'images, il est donc nécessaire de décrire le processus optique par lequel une image est créée. Cela comprend tous les éléments qui contribuent à ce processus, tels que les sources de lumière, les propriétés de la surface de l'objet, le milieu à travers lequel la lumière se déplace, la technologie des capteurs et des caméras, le traitement de l'image et le traitement ultérieur Figure 62.

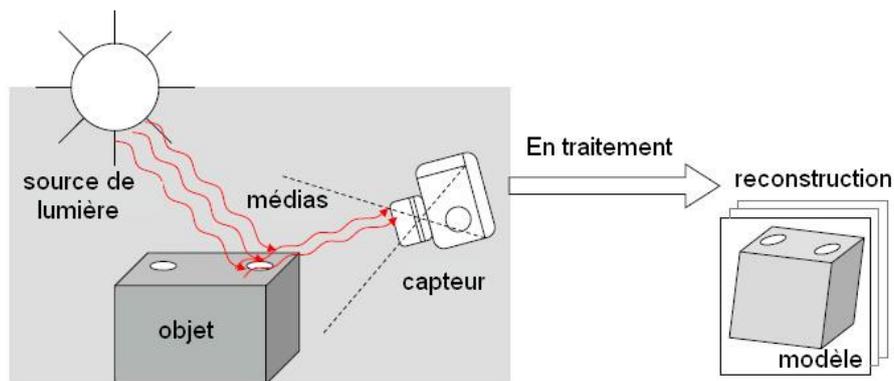


Figure 62 : De l'objet à l'image. [12]

A partir de ces mesures et d'une transformation mathématique entre image et espace objet, l'objet peut enfin être modélisé.

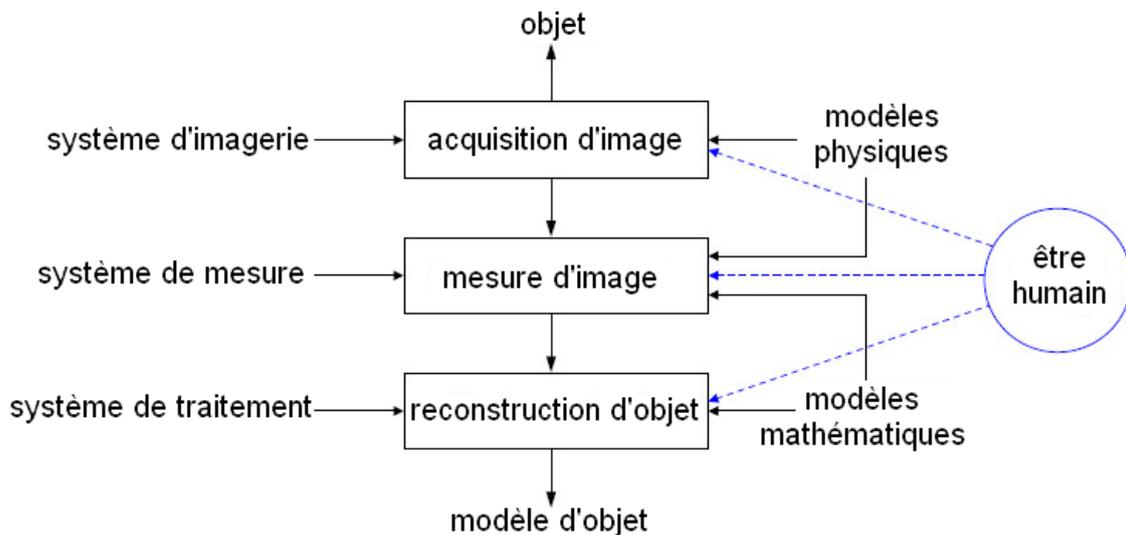


Figure 63 : Le processus photogrammétrique : de l'objet au modèle.

2.1. Traitement d'image unique

Les procédures photogrammétriques pour le traitement d'une seule image sont conçues soit pour la détermination des coordonnées de l'objet, soit pour la rectification optique ou informatique de l'image en une projection géométrique différente. Dans les deux cas, des données d'orientation de l'image et une géométrie d'objet supplémentaire (points de référence, éléments géométriques) sont nécessaires. En général, il faut distinguer le cas des objets plans de celui des surfaces tridimensionnelles arbitraires.

Le traitement se fait en deux étapes :

- Transformation projective
- Évaluation d'image unique de modèles d'objets tridimensionnels

2.2. Traitement stéréoscopique :

Le traitement stéréo couvre toutes les méthodes visuelles ou informatiques pour le traitement d'une paire d'images stéréo. Il est appliqué dans le cas de la photogrammétrie aérienne.

Dans le travail à courte portée, la photogrammétrie stéréo est principalement utilisée dans les applications suivantes :

- Traitement visuel des caractéristiques naturelles
- Reconstruction visuelle ou numérique de surfaces de forme libre
- Acquisition d'images avec des caméras stéréométriques
- Mesure d'objets point par point (tactile) avec des systèmes à double caméra en ligne
- Contrôle de machines basées sur la vision (par exemple, des robots autonomes)

Le principe du traitement stéréo est basé sur la correspondance de points homologues situés dans un plan épi polaire. Ce plan coupe les plans image en lignes épi polaires. Pour le cas normal de la photogrammétrie stéréo (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les lignes épi polaires sont parallèles et les informations de profondeur peuvent être déterminées en mesurant la x-parallaxe p_x en deux méthodes.[33]

- Détermination des points à l'aide des coordonnées d'image

- Détermination du point avec marque flottante

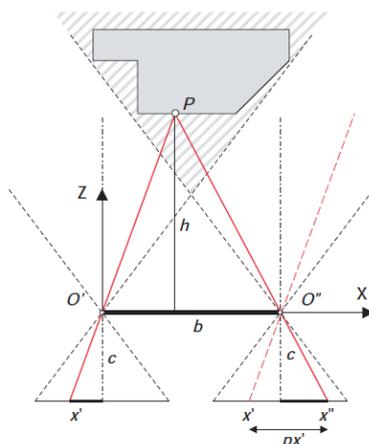


Figure 64 : Cas normal de la photogrammétrie stéréo. [12]

2.3. Traitement multi-image :

Cette section traite des méthodes analytiques de reconstruction d'objets basées sur des coordonnées d'image mesurées à partir d'un nombre illimité de photos. Les méthodes numériques multi-images qui traitent en plus les valeurs de gris aux points d'image.

Les méthodes suivantes nécessitent des paramètres connus d'orientation intérieure et extérieure qui sont généralement calculés par triangulation de faisceau. Sur cette base, des points d'objet, des surfaces et des éléments géométriques de base peuvent être déterminés.

Les méthodes de traitement multi-image sont :

- Intersection d'espace général
- Détermination directe des éléments géométriques
- Détermination des courbes spatiales (serpents)

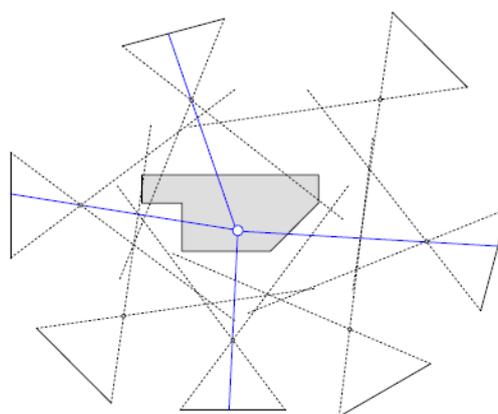


Figure 65 : Traitement multi-image. [12]

3. Les solution complète :

Ça veut dire un traitement de la reconstitution dans le cloud, Vous donnez au programme les images sur lesquelles vous souhaitez travailler et attendez un certain temps, puis l'entreprise vous envoie dans votre compte un message contenant un fichier traité complètement et vous pouvez manipuler sur elle facilement.

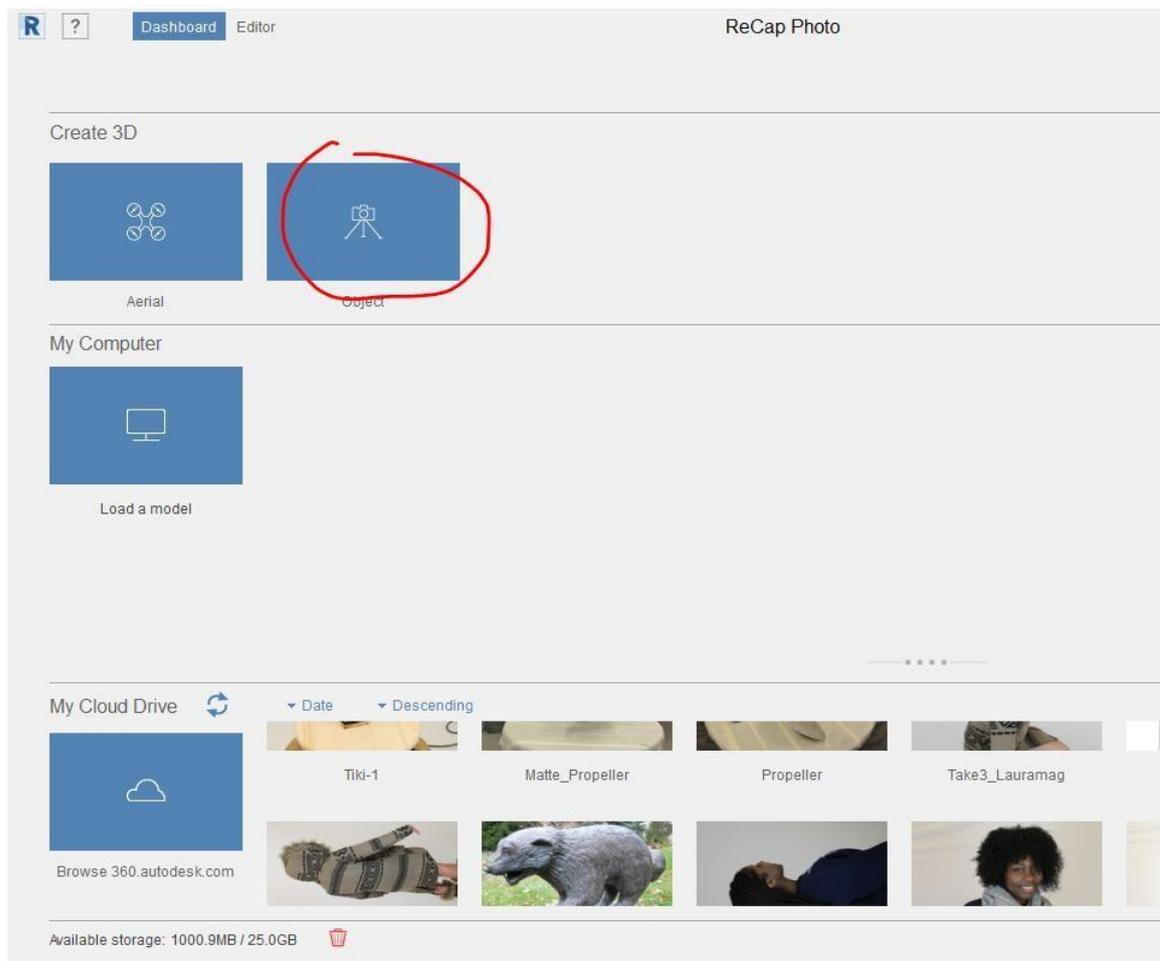
Un exemple Traitement online des images de photogrammétrie avec Autodesk Recap Photo :

Étape 1 : Créez votre compte Autodesk gratuit ici

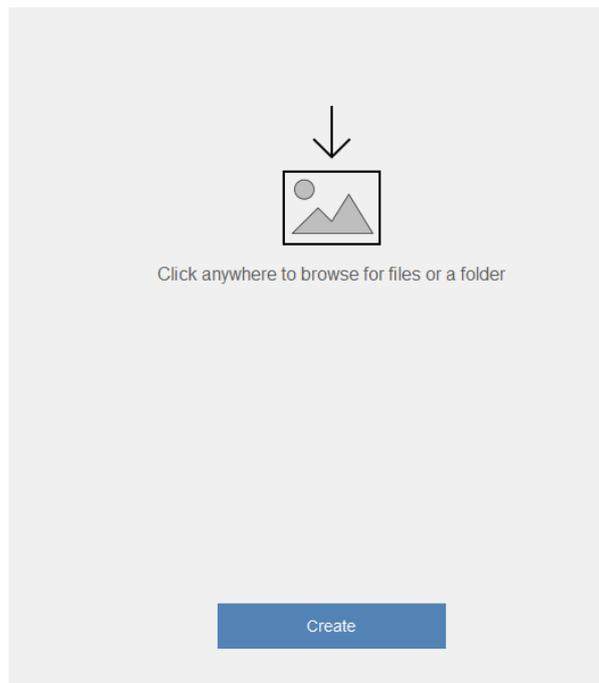
<https://knowledge.autodesk.com/customer-service/account-management/account-profile/create-autodesk-account>

Étape 2 : Téléchargez ou lancez Autodesk Recap Photo (qui fait partie de Recap Pro Educational) et connectez-vous avec les informations de votre compte Autodesk.

Étape 3 : Sélectionnez « objet » pour soumettre vos images au traitement



Étape 4 : Recherchez ou faites glisser et déposez vos images dans la zone et appuyez sur « créer » :



Étape 5 : Donnez un nom à votre projet et appuyez sur "Démarrer" :

Create Project ×

Project name:

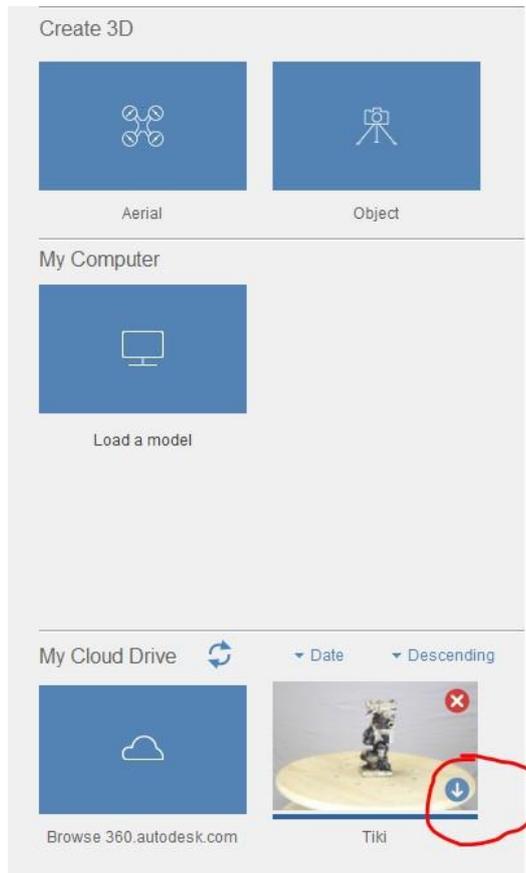
Auto-crop

[ReCap Terms of Service](#)

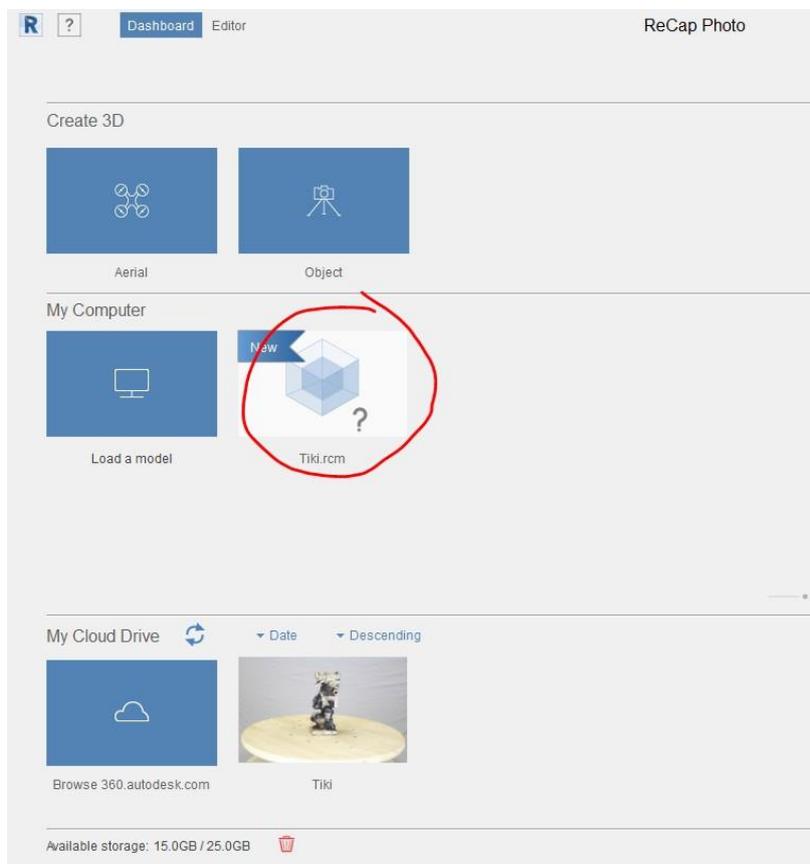
Start

Étape 6 : Vos images seront téléchargées sur le service cloud d'Autodesk et placées dans une file d'attente pour traitement. Une fois les images téléchargées, vous pouvez vous déconnecter de l'ordinateur et revenir quelques heures plus tard pour télécharger vos résultats. Tous les modèles traités sont enregistrés dans votre compte Autodesk.

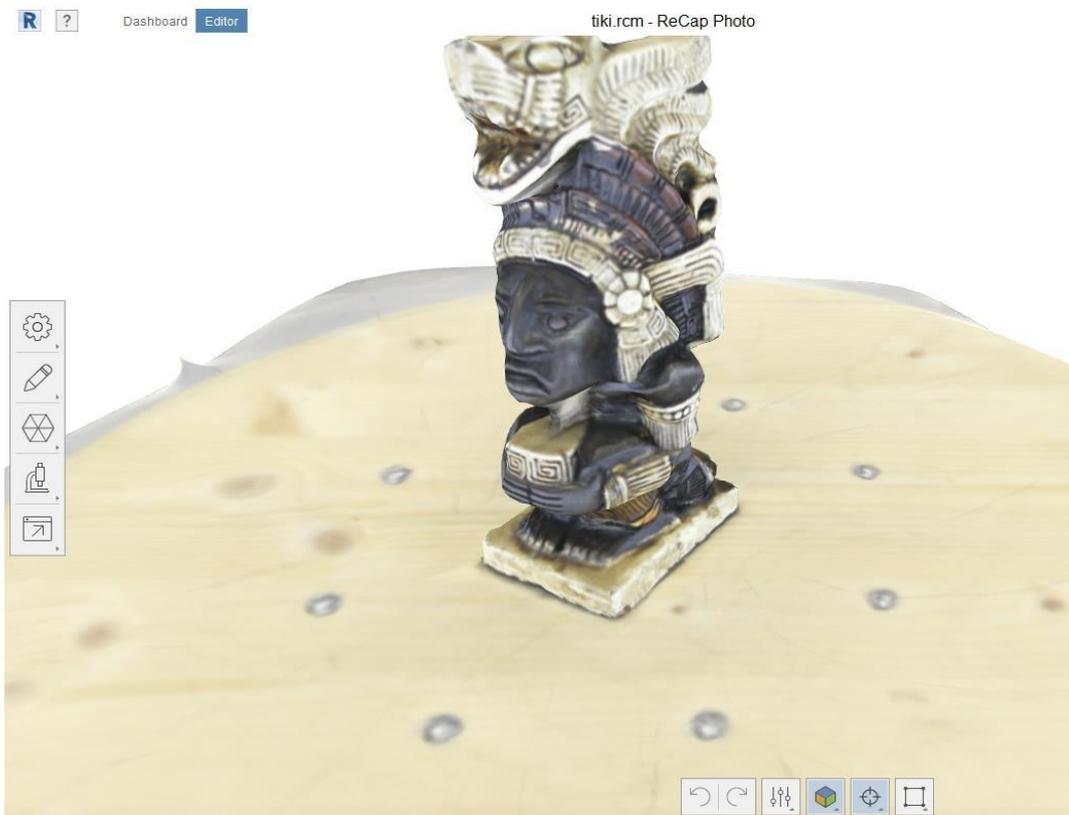
Étape 7 : Cliquez sur le bouton de téléchargement une fois votre analyse terminée pour la télécharger. Désignez un emplacement sur l'ordinateur pour enregistrer les fichiers.



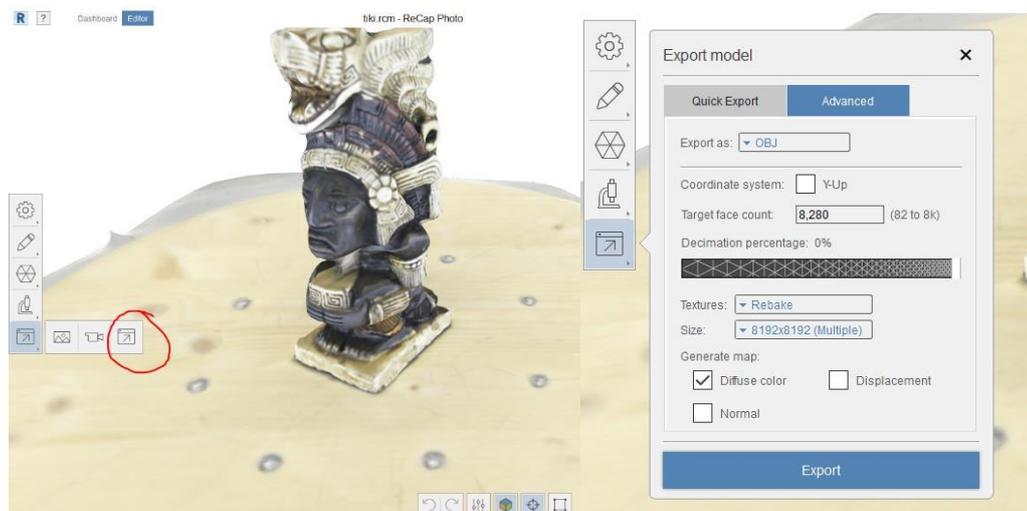
Étape 8 : Autodesk téléchargera votre modèle 3D et placera un raccourci pour le charger dans Recap Photo. Cliquer sur cette icône vous permettra de charger et de manipuler le modèle résultant



Étape 9 : La barre latérale gauche vous donne des outils pour lisser le maillage, remplir les trous, redessiner les détails et exporter. La barre inférieure vous donne des modes de visualisation de votre modèle (texturé, filaire, non texturé) et un outil de sélection pour supprimer les polygones supplémentaires (mettez en surbrillance les zones du modèle avec l'outil de sélection et appuyez sur Supprimer sur votre clavier).



Étape 10 : Lorsque vous êtes prêt à exporter, accédez à la dernière option de la barre latérale gauche. Pour les modèles non colorés destinés à l'impression 3D, vous souhaitez exporter votre modèle au format * .STL - Pour les besoins numériques où vous souhaitez conserver les informations de couleur, * .OBJ et * .FBX sont généralement préférés.



4. Matériels d'acquisition :

Concernant le matériel d'acquisition, il existe différentes caméras et elles sont différentes selon les paramètres internes et externes et les équipements supplémentaires (les objectifs).

4.1. Les types des caméras :

4.1.1.1. Visueur ou appareils photo compacts :



a) Casio Exilim EX Z-1000



b) Sony Ericsson DSC W190



Figure 67 : GSI INCA 3. [12]

Figure 66 : Exemples d'appareils photo compacts numériques. [12]

4.1.1.2. Appareil photo reflex mono-objectif :

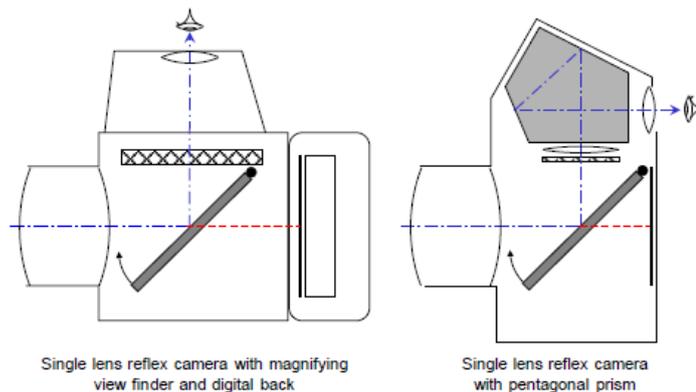


Figure 68 : Appareils photo reflex à objectif unique (d'après Marchesi 1985). [12]



Figure 69 : Hasselblad H4D-60. [12]



Figure 70 : Nikon D3. [12]

4.1.1.3. Caméra de studio :

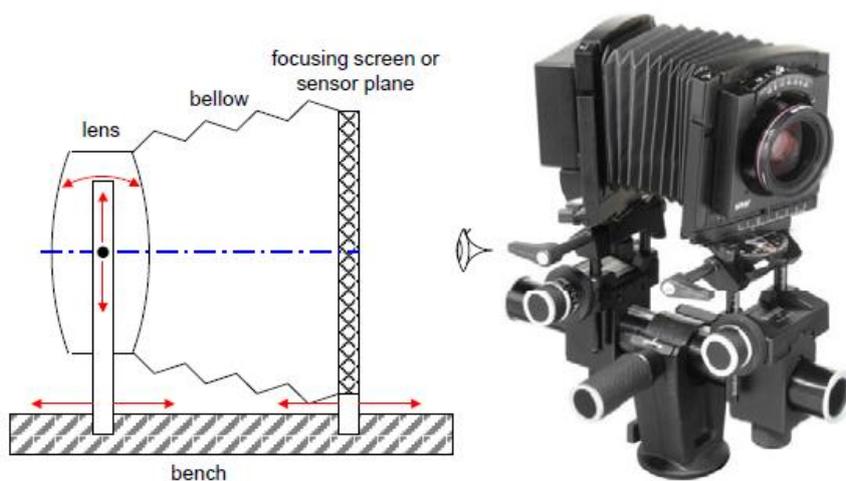
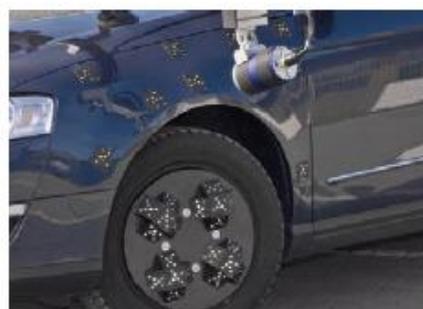


Figure 71 : Caméra de studio (Sinar). [12]

4.1.1.4. Caméras haute vitesse :



a) AICON TraceCam F



b) TraceCam in use for wheel movements

Figure 73 : Caméra ultra-rapide avec mesure de point intégrée (AICON).



Figure 72 : Caméra haute vitesse avec fixation de miroir stéréo (HS Vision).



a) Stereo camera for use in medical navigation applications (AXIOS 3D)

b) 4-camera system for monitoring movements of crash dummies (AICON)

Figure 74 : Stéréo et les systèmes multi-caméras.

4.2. La classification des caméras par frame :

Name	Type	Sensor type/ resolution	Sensor size [mm]	Pixel size [μm]	Weight [kg] ¹	RAW file	Frame rate	Shutter speed
Hasselblad H4D-60	Medium Format DSLR	CCD / 60 Mpx	53.7 × 40.2	6	1.8	16-bit	0.7 fps	1/800
Pentax 645 D	Medium Format DSLR	CCD / 40 Mpx	44 × 33	6	1.48	14-bit	1.1 fps	1/4,000
Mamiya DM33	Medium Format DSLR	CCD / 33 Mpx	48 × 36	7	1.63	16-bit	1.1 fps	-
Canon EOS-1Ds Mark III	35 mm full frame format DSLR	CMOS / 22 Mpx	36 × 24	6.4	1.385	14-bit	5 fps	1/8,000
Nikon D3X	35 mm full frame format DSLR	CMOS / 24.5 Mpx	35.9 × 24	5.95	1.260	14-bit	5 fps	1/8,000
Sony α900	35 mm full frame format DSLR	CMOS/ 24.6 Mpx	35.9 × 24	5.9	0.895	12-bit	5 fps	1/8,000
Sony αNEX-5	APS C	CMOS / 14 Mpx	23.5 × 15.7	5.1	0.287	12 bit	2.3 fps	1/4,000
Olympus E-PL2	Micro four Thirds system	Live MOS / 12.3 Mp	17.3 × 13	4.3	0.317	12-bit	3 fps	1/4,000
Panasonic Lumix DMC-GH2	Micro four Thirds system	Live MOS / 16.1 Mpx	18.9 × 14.5	4.1	0.394	12-bit	5 fps	1/4,000

Tableau 3 : Appareils photo numériques terrestres les plus courants (Sans objectif). [30]

<i>Format</i>	<i>System</i>	<i>Sensor type</i>	<i>No. frames/lines</i>	<i>Spectral Bands</i>	<i>Geometric resolution</i>	<i>Pixel size [µm]</i>
SMALL FORMAT	MosaicMill / EnsoMosaic	Frame	1	RGB	21 Mpx (Canon Eos 1DS Mark III)	6.4
	Geoniss	Frame	1	RGB	24 Mpx (Nikon D3X)	6
	VisionMap A3	Frame	2	PAN, RGB, NIR	11 Mpx per frame	9
	VisionMap MIST	Frame	1	RGB	11 Mpx	9
	Tiltan System Eng. AMU	Frame	2	RGB	11 Mpx per frame	9
	Track'Air MIDIS	Frame	5, 9	RGB	21 Mpx per frame (Canon Eos 1DS Mark III)	6.4
MEDIUM FORMAT	Wehrli 3-DAS-1	Linear	3	RGB	8,023 px per line	9
	Trimble DSS Wideangle	Frame	1	RGB	6,732 × 8,924 px (60 Mpx)	6.8
	Trimble DSS Dualcam	Frame	2	RGB, NIR	5,412 × 7,216 px per frame	6.8
	Trimble Aerial Camera	Frame	1	RGB, NIR	22, 39 or 60 Mpx	9, 6.8, 6
	Trimble Aerial Camera X4	Frame	4	RGB	39 or 60 Mpx per frame (135 or 210 Mpx composite)	6.8, 6
	Optech / DIMAC wide	Frame	2	RGB	13,000 × 8,900 px composite	6
	Optech / DIMAC light	Frame	1	RGB	8,984 × 6,732 px	6
	IGI DigiCAM	Frame	1,	RGB, NIR	60, 50, 39 Mpx	6, 6, 6.8
			2,		118, 98, 76 Mpx	
			3,		175, 145, 112 Mpx	
4,			235, 191, 145 Mpx			
5			60, 50, 39 Mpx			
LARGE FORMAT	Z/I Imaging DMC II 250	Frame	4 PAN	PAN,	PAN: 250 Mpx (17,216 × 14,656 px)	5.6
	4 MS		RGB, NIR	MS: 4 × 42 Mpx (6,846 × 6,096 px)	7.2	
	Microsoft/Vexcel UltraCam Xp	Frame	9 PAN	PAN,	PAN: 196 Mpx (17,310 × 11,310 px)	6
	4 MS		RGB, NIR	MS: 22 Mpx (5,770 × 3,770 px)	6	
	Leica ADS-80	Linear	4 PAN	PAN,	12,000 px per line	6.5
		4 MS	RGB, NIR			

Tableau 4 : Appareils photo et systèmes numériques aéroportés primaires. [30]

	Full Frame	APS-H	APS-C	4/3	1"	1/1.63"	1/2.3"	1/3.2"
DIMENSION	36 x 23.9mm	27.9x18.6mm	23.6x15.8mm	17.3x13mm	13.2x8.8mm	8.38x5.59mm	6.16x4.62mm	4.54x3.42mm
AREA	8.6 cm ²	5.19 cm ²	3.73 cm ²	2.25 cm ²	1.16 cm ²	0.47 cm ²	0.28 cm ²	0.15 cm ²
SENSOR								
CAMERA								

Figure 75 : les types des capteurs de la caméras. [28]

4.3. Les équipements supplémentaires (les objectifs) :

Un objectif photographique est un système optique convergent former de plusieurs lentilles, et éventuellement de miroirs, donnant des images réelles sur la surface sensible de l'appareil photographique. Un objectif se caractérise en premier lieu par sa distance focale, son ouverture maximale, et le format maximum de la surface sensible avec lequel il est utilisable. [34]

Un objectif photographique ou la cornée de l'œil n'ont à l'origine qu'une seule fonction : concentrer la lumière (pour chaque point de l'image) pour sensibiliser la rétine ou le capteur photo. [34]

Il y a plusieurs types des objectifs comme suite :



Figure 76 : objectif simple de la caméra. [28]

En ce qui concerne **logicielle Photomodeler gratuite** N'a pas besoin de matériel ou d'équipement coûteux.[35]

Pour PhotoModeler Premium :

La configuration système minimale requise pour PhotoModeler Premium (lors de la réalisation de projets SmartMatch et Dense Modeling) est[36] :

- Intel Core i7
- 16 Go de RAM, (plus vous pouvez vous offrir de RAM, mieux c'est, 32 à 64 Go de RAM ou plus n'est pas rare)
- 5 Go d'espace sur le disque dur
- Matériel audio pour les didacticiels vidéo

Pour créer vos propres modèles, une méthode de capture d'images est nécessaire, comme un appareil photo numérique. [36]

Spécifications :

La configuration optimale de l'ordinateur et la configuration matérielle requise pour utiliser PhotoModeler dépendent de la version du logiciel que vous utilisez et du type de projets que vous exécutez. [36]

Les types de projets de nuages de points et maillages automatiques (SmartPoints) - qui incluent la grande majorité des projets aériens - dans PhotoModeler Premium peuvent être gourmands en matériel. Le système d'exploitation Windows 64 bits est nécessaire pour accéder à de plus grandes quantités de RAM (idéalement 32 Go ou plus). Si vous utilisez des images à résolution relativement élevée et un grand nombre de photos, un processeur plus rapide comme Intel i7 ou i9 peut vous aider à réduire le temps de traitement.[36]

Pour logicielle 3DF Zephyr :

3DF Zephyr est une application autonome qui s'exécute sur un environnement Windows. Une connexion Internet est nécessaire pour la première activation du produit. Veuillez noter que 3DF Zephyr est une application exigeante en termes de calcul car elle tire parti de tous les cœurs de processeur disponibles et utilise la technologie Nvidia Cuda lorsqu'elle est disponible. Veuillez noter qu'une carte vidéo compatible CUDA peut considérablement améliorer les performances.[37]

Exigence minimale du système[37] :

- Système d'exploitation : Windows 10 / 8.1 / 8 64 bits
- Processeur : Dual Core 2.0GHz ou processeur équivalent
- Mémoire : 16 Go de RAM système
- Espace disque dur : 10 Go d'espace libre sur le disque dur
- Carte vidéo : carte vidéo compatible Direct X 9.0c avec 256 Mo de RAM

Configuration système recommandée[37] :

- Système d'exploitation : Windows 10 / 8.1 / 8 64 bits
- Processeur : CPU Intel ou AMD quadricœur
- Mémoire : 32 Go de RAM système
- Disque dur : 20 Go d'espace libre sur le disque dur - lecteur SSD

- Carte vidéo : carte vidéo NVIDIA avec 2 Go de RAM et capacités Cuda >=

6. Paramétrage recommandé pour l'appareil photographique :

Procéder au scanning d'une scène par photogrammétrie nécessite quelques connaissances de base en matière de photographie. Bien que chacun d'entre nous soit un utilisateur régulier d'appareils photos et de smartphones, prenons le temps de détailler les notions ayant un impact important lorsqu'on souhaite pratiquer la photogrammétrie.[38]

Lors d'une prise de vue, il est possible d'ajuster 5 paramètres pour contrôler la qualité de la photo :

6.1. La résolution :

Cette notion est connue de la grande majorité des utilisateurs et désigne le nombre de pixels capturés par l'appareil à chaque fois qu'une photo est prise. [38]



Figure 80 : La résolution d'une photo détermine la quantité d'informations utilisable en photogrammétrie. [38]

6.2. La distance focale :

Cette valeur est exprimée en millimètres et correspond à la distance entre le capteur et le centre optique de l'objectif. [38]

La longueur focale influe sur le grossissement du sujet à photographier et sur l'angle de vision.



Figure 81 : La distance focale désigne le "zoom".[38]

Plus la focale est courte, et plus l'angle de vision est grand.

Les objectifs dits « grand-angle » ont donc une distance focale faible, généralement autour de 16 mm alors que les « téléobjectifs » dépassent allègrement les 400 mm. Lorsqu'on utilise le zoom d'un appareil photo on influe donc sur la distance focale. [38]

Pour reconstruire une scène en 3D, l'utilisation de grands angles constitue souvent un gain de temps important.

6.3. L'ouverture :

Le diaphragme d'un appareil photo est une sorte de bague mécanique dont le diamètre varie pour influencer sur la quantité de lumière pénétrant dans le capteur.

Quand on parle d'ouverture, on parle de l'ouverture du diaphragme. Le choix de l'ouverture a une incidence directe sur la "profondeur de champ", notion désignant le segment en profondeur de l'image sur laquelle la netteté sera acceptable. Une grande ouverture (f/2.8) provoque une faible profondeur de champ et donc un flou très prononcé de l'arrière-plan. [38]



Figure 82 : Le flou d'arrière-plan, bien qu'esthétique, est l'ennemi de la photogrammétrie. [38]

Cet effet dit "de focus", également nommé bokeh, présente des intérêts pour les photographes professionnels qui peuvent ainsi réaliser de sublimes portraits mais qui est totalement contre-productif lorsqu'on parle de photogrammétrie, pour laquelle nous avons besoin d'un maximum de précision y compris à l'arrière-plan des photographies. [38]

Il sera donc préférable de privilégier une petite ouverture qui crée une grande profondeur de champ et améliore la précision de l'arrière-plan.

6.4. La vitesse d'obturation :

Le boîtier d'un appareil photo contient un obturateur. Il s'agit d'un mécanisme à rideaux qui recouvre le capteur lorsqu'il est au repos. [38]

Ce rideau s'ouvre à une vitesse variable de manière à exposer plus ou moins longtemps le capteur à la lumière. [38]

Plus la vitesse d'obturation est rapide, et moins le capteur reçoit de lumière.



Figure 83 : Le temps d'exposition influe sur la luminosité de la photo. [38]

6.5. La sensibilité ISO :

La sensibilité ISO désigne la capacité du boîtier à être sensible à la lumière. Chaque capteur a une sensibilité de base qu'il est possible d'augmenter pour compenser un manque de lumière, Ainsi, le signal lumineux est amplifié par un circuit électronique afin d'accroître la luminosité des pixels. S'agissant d'une correction électronique, un "bruit" important, parfois nommé "grain", apparaît alors sur les images. [38]



Figure 84 : Augmenter la sensibilité ISO génère des pixels aberrants. [38]

Si, en théorie, le choix de la sensibilité ISO permet certains compromis entre vitesse, ouverture et focale, l'idéal restera d'utiliser la sensibilité ISO la plus faible possible pour obtenir une meilleure qualité d'image. [38]

7. Méthodologie de prise de vue :

Ce titre détaille les méthodologies de prise de vue nécessaires dans certains cas :

7.1. Prise de vue circulaire simple :

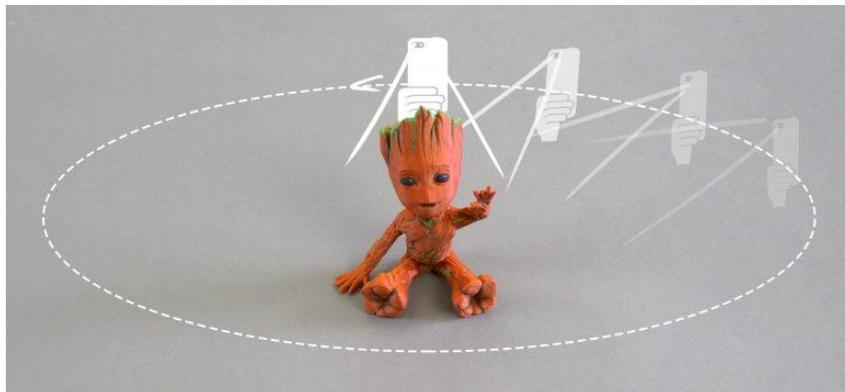


Figure 85 : prise de vue simple avec smartphone. [27]

- Vous souhaitez capturer au moins 20 photos.
- Déplacez-vous autour de l'objet cible en cercles. **Ne déplacez pas l'objet ou son environnement entre les images.**
- Chevauchement ! Vous voulez que chaque partie du modèle soit capturée par au moins 2 images. Idéalement, vous auriez un chevauchement d'environ 60 à 80% dans les images suivantes. [27]

7.2. Prise de vue circulaire (cercle concentrique) :

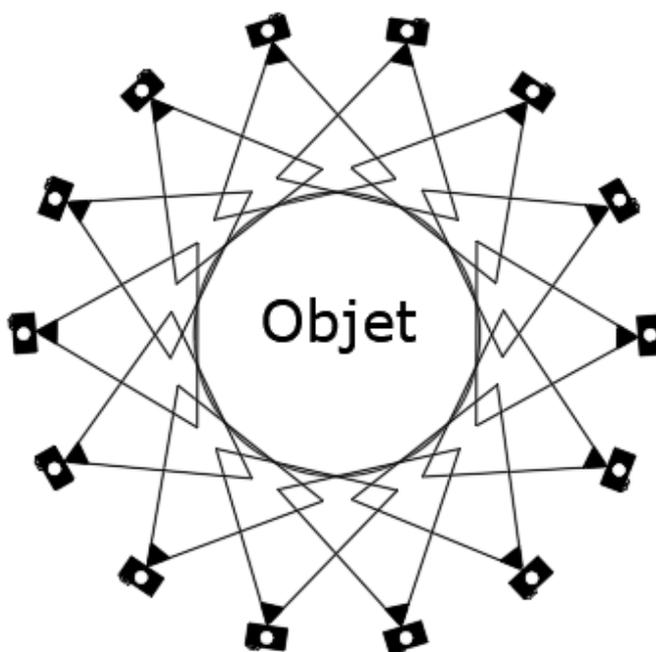


Figure 86 : Prise de vue circulaire.

7.3. Prise de vue linéaire :

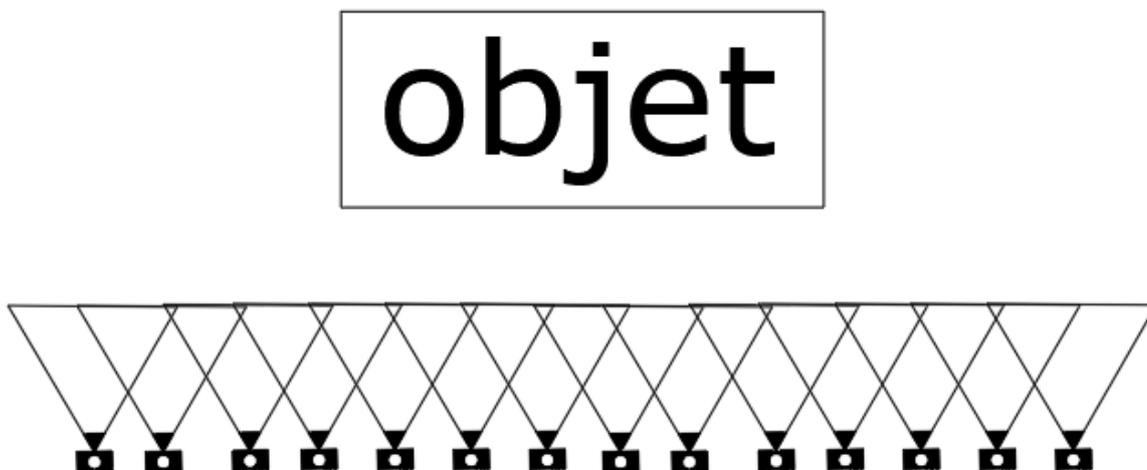


Figure 87 : prise de vue linéaire.

7.4. Autre configuration :

Utilisez cette technique (Figure 88) avec des surfaces planes ou régulières dans des domaines d'application tels que l'architecture et la photogrammétrie aérienne. Des triangles blancs indiquent les positions de la caméra et leur champ de vision.[39]

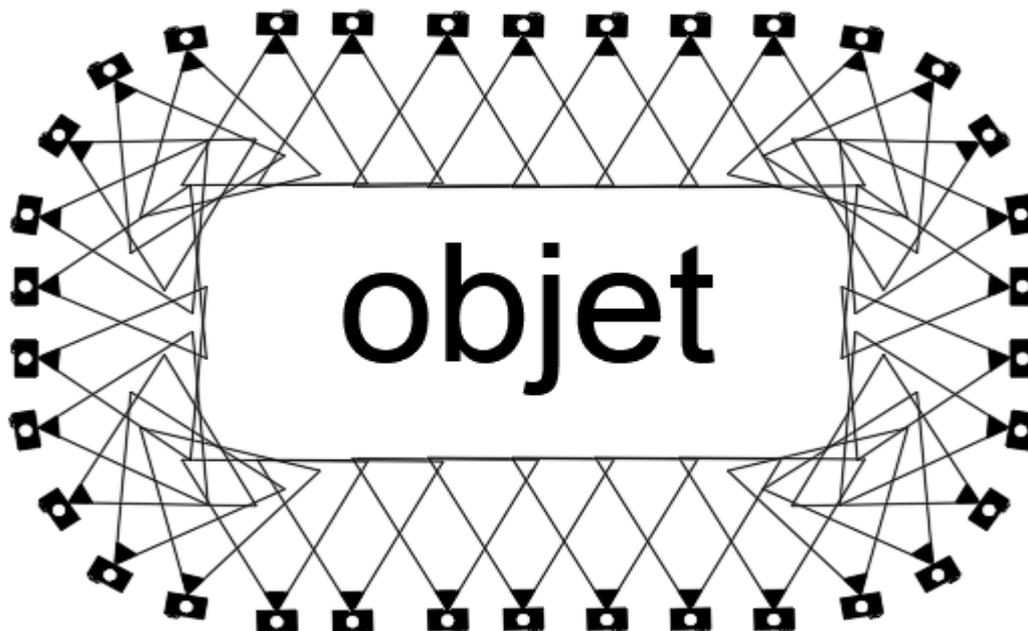


Figure 88 : Capture d'axe parallèle.

Utilisez cette technique (Figure 89) lorsqu'il est possible de se déplacer autour d'objet / de la scène. [39]

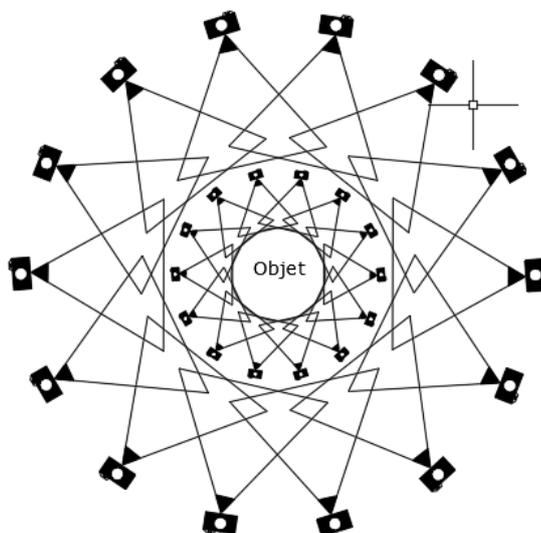


Figure 89 : Capture d'axe convergent.

Utilisez cette technique (Figure 90) lors de la capture des intérieurs. [39]

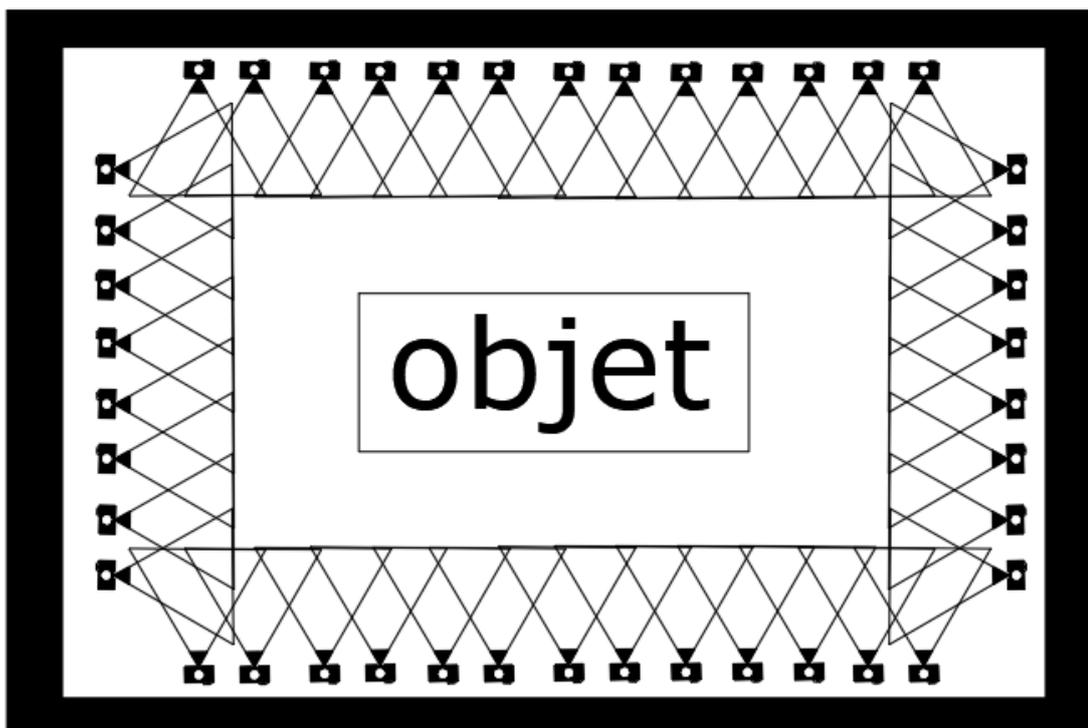


Figure 90 : Capture des intérieurs.

Chapitre 04 :
Les applications à la
Photogrammétrie

1. Introduction :

La principale application de la photogrammétrie est l'établissement des plans et cartes topographiques à partir de photographies aériennes. Qu'il s'agisse des cartes de base d'un pays (à des échelles variantes, selon les régions, de 1 :5 000 à 1 :200 000) ou des levés nécessaires aux projets de génie civil, aux aménagements hydrauliques, à l'urbanisme, au cadastre, etc., les méthodes photogrammétriques sont maintenant d'un emploi universel. Mais, technique de mesure présentant les avantages de l'instantanéité, de l'enregistrement simultané de toute la surface de l'objet et de la conservation de cet enregistrement, la photogrammétrie est appliquée à l'étude de la forme et des dimensions d'objets très divers, ainsi qu'au relevé des mouvements et des transformations de ces objets : contrôle d'ouvrages d'art, cubatures dans les mines et carrières, industrie automobile (carrosserie), hydraulique (ondes, mouvements de l'eau), trajectographie et étude du déplacement des véhicules, analyses de la circulation et constats d'accidents, sciences de la Terre (microgéologie, glaciologie, avalanches, courants aériens, houles et marées), astronomie et géodésie sur satellites artificiels, médecine (notamment photogrammétrie des rayons X), biologie, zoologie, etc. La microscopie optique et électronique, appliquée à toutes sortes d'objets, peut également conduire à des mesures photogrammétriques. L'utilisation des techniques photogrammétriques pour les relevés architecturaux et archéologiques ne cesse de se développer.[40]

Enfin, les images spatiales, véritables photographies ou enregistrements électroniques de signaux, peuvent maintenant faire l'objet d'un traitement photogrammétrique grâce au développement des méthodes analytiques ; les possibilités de cartographie dans les pays neufs et de mise à jour des cartes sur toute la Terre s'en trouvent considérablement accrues. [40]

2. Les exemples d'application dans différents domaines :

2.1. Travaux archéologiques ou architecturaux :

Architecture, conservation du patrimoine, archéologie :

- Mesure de façade.
- Documentation du bâtiment historique.
- Mesure de déformation.
- Reconstruction des bâtiments endommagés.
- Cartographie des sites de fouilles.
- Modelage de monuments et de sculptures.
- Modèles de villes 3D et texturation.

Voilà quelques exemples dans ce domaine :

Château de Haderburg :

La reconstruction photogrammétrique du château d'Haderburg à Salurn (Salorno) démontre les avantages de la photogrammétrie à courte portée par rapport aux méthodes de mesure alternatives basées sur des scanners laser ou des stations totales. En raison de l'emplacement inaccessible, les images nécessaires ne pouvaient être prises qu'à partir d'un hélicoptère (Figure 91) Les 50 images haute résolution et grand format, prises avec une caméra métrique Jenoptik UMK calibrée, ont fourni un nombre minimum d'images pour assurer une cartographie suffisamment précise du château à une échelle de 1 :50.[12]



Figure 91 : Enregistrement d'images par hélicoptère à l'aide d'une caméra métrique UMK. [12]



Figure 92 : Dessin d'élévation du château. [12]

Enregistrement 3D de Pompéi :

L'enregistrement complet des fouilles de Pompéi illustre bien l'utilisation de diverses sources de données pour créer une documentation 3D complète d'un grand objet étendu. Les quelque 350 trouvailles réparties sur le site, ainsi que les murs debout et leurs détails, doivent être enregistrés dans un seul modèle 3D. Cela est nécessaire pour préparer les données à différents niveaux de résolution à des fins de conservation numérique, d'animation (réalité virtuelle) et de connexion aux bases de données archéologiques. [12]

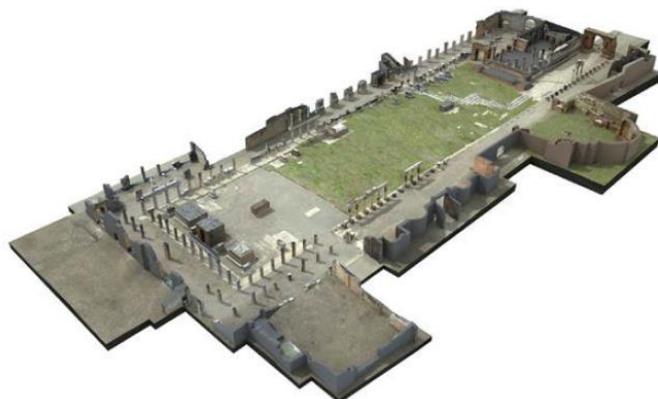


Figure 94 : Modèle 3D du Forum de Pompéi (FBK Trento, Politecnico di Milano). [12]



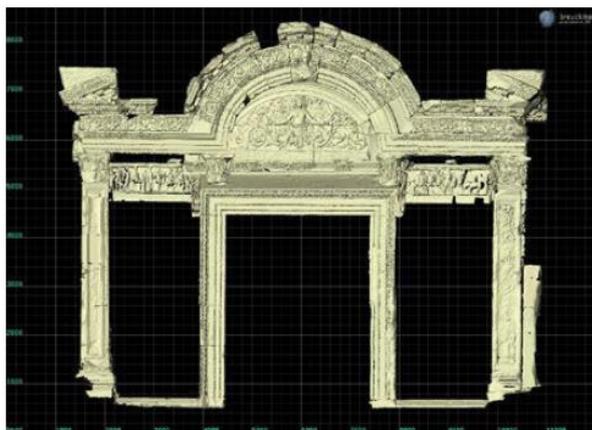
Figure 93 : Coupes détaillées du modèle 3D de Pompéi (FBK Trento, Politecnico di Milano). [12]

Grands objets de forme libre :

La reconstruction 3D du temple d'Hadrien à Ephèse (Turquie) illustre la mesure d'un grand objet complexe à l'aide de la projection de franges et de l'orientation photogrammétrique des nuages de points résultants. Quelque 75 cibles codées ont été attachées à l'objet (Figure 95) et enregistrées dans un réseau multi-images à l'aide d'un appareil photo numérique Nikon D3. Ils ont été localisés en 3D à l'aide du système AICON DPA Pro. De plus, 35 des points ont été intersectés par le théodolite qui a été utilisé pour les référencer au système de coordonnées géodésiques local. La précision des points de contrôle était d'environ 1 à 2 mm. [12]



a) Temple avec cibles photogrammétriques



b) Modèle 3D de l'entrée principale

Figure 95 : Enregistrement du temple d'Hadrien par projection de franges et photogrammétrie (AICON / Breuckmann, Institut archéologique autrichien). [12]

2.2. Arpentage d'ingénierie :

Industries de l'automobile, des machines et de la construction navale :

- Inspection des gabarits d'outillage
- Rétro-ingénierie des modèles de conception
- Contrôle de fabrication.
- Construire des systèmes d'information
- Gestion des installations
- La planification de la production
- Bases de données d'images
- Applications Internet (globes numériques)

2.2.1. Documentation intégrée :

La documentation des tuyauteries complexes est d'une importance considérable. Les sites pertinents tels que les usines chimiques, les raffineries de pétrole et les ouvrages hydrauliques sont caractérisés par des conditions environnementales difficiles, une mauvaise visibilité et des géométries complexes. L'objectif de la documentation est de produire un inventaire et des plans corrects qui, en pratique, ne peuvent être traités que par des systèmes de CAO 3D en raison de la nature tridimensionnelle de l'installation. Les données acquises peuvent être utilisées pour les vues 2D et 3D, l'analyse d'inventaire, ainsi que la simulation des processus de production.[12]

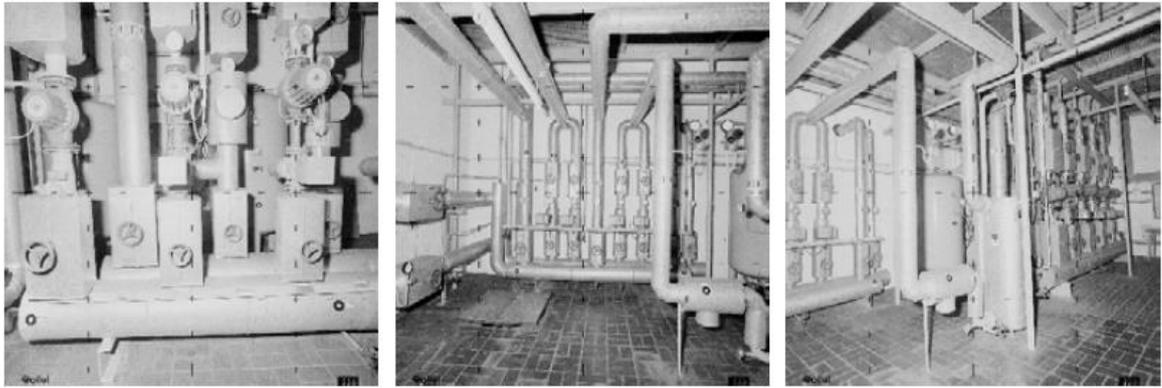


Figure 96: Images métriques de tuyauterie (INVERS). [12]

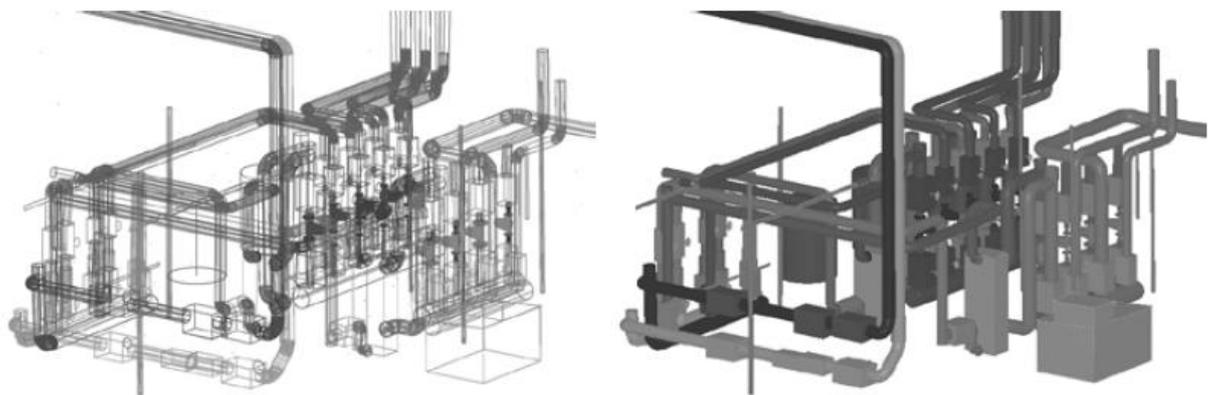
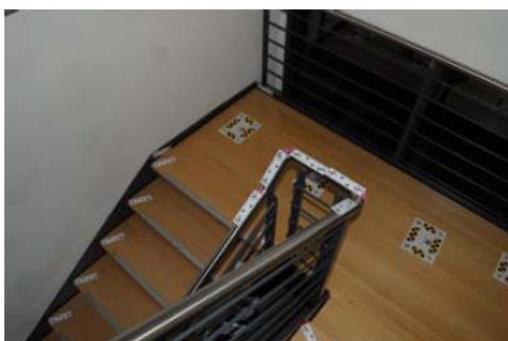


Figure 97: Modèle de fil CAO et vue rendue de la tuyauterie (INVERS). [12]

2.2.2. Mesure de la cage d'escalier :

L'enregistrement tridimensionnel des cages d'escalier est une tâche complexe en raison des conditions habituelles sur place (accessibilité, visibilité). Le problème peut être résolu photogrammétriquement lorsque les éléments à mesurer (bords, coins, marches, mains courantes) sont ciblés de manière appropriée et qu'une configuration d'imagerie appropriée est sélectionnée. [12]



a) Ciblage à l'aide d'adaptateurs de cible spéciaux



b) Analyse 3D

Figure 98: Mesure photogrammétrique de la cage d'escalier (AICON, ThyssenKrupp). [12]

2.3. Reconnaissance de forme :

Exemple d'application de surveillance de la déformation des pentes :

Point de contrôle d'image et points de surveillance :

Les points de contrôle ont été disposés aux abords de la pente et les points de contrôle ont été disposés en pente interne. Une imagerie claire et une identification facile sont nécessaires pour les points de contrôle et les points de surveillance. Le matériau des points de contrôle et des points de surveillance est carrelé blanc, qui est posé dans le processus de construction construit pour le support. [41]



Figure 99: Graphique de scène des points de contrôle. [41]

Surveillance des déformations et traitement des données :

L'appareil photo numérique Nikon D100 a été utilisé pour la photogrammétrie, qui a 12 millions de pixels et une distance focale de 85 mm. Seulement 6 images ont été nécessaires pour couvrir toute la pente mesurée. Il y a cinq stations de caméra et 30 images. [41]

Time Cost							
Measurement at Image Control Point	Photography		Indoor Work		Other Work		Total Time
60 min	60 min		180 min		120 min		420 min
Accuracy Statistics of Photogrammetry							
Variance of Unit Weight	Absolute Orientation Accuracy				Relative Accuracy		
0.001126 mm	RmsX	RmsY	RmsZ	Rms	Plane	Elevation	Average
	0.0087m	0.0242m	0.0051m	0.0275m	1/12353	1/59842	1/12152
Selected Monitoring Points Comparison Analysis							
	Monitoring Point A			Monitoring Point B			
	X	Y	H	X	Y	H	
Total Station/m	3123.244	1112.493	312.7175	3009.124	1123.632	215.5683	
Photogrammetry/m	3123.251	1112.502	312.7285	3009.132	1123.641	215.5781	
Differences/mm	7.1	8.5	11	8.5	9.1	9.8	

Tableau 5: surveillance des déformations. [41]

Le Tableau précédent montre que les résultats de la surveillance des déformations de la photogrammétrie peuvent atteindre le niveau centimétrique et même millimétrique, ce qui a peu de différence avec les résultats de la station totale. Il est possible d'utiliser la photogrammétrie à courte portée dans la construction de la surveillance des pentes avec une précision appropriée. De plus, la mise en œuvre et le fonctionnement de la photogrammétrie sont plus rapides et plus pratiques que les levés géodésiques normaux, ce qui est sûr et réduit les travaux, bien que la précision soit inférieure par rapport à la méthode de surveillance de la station totale. [41]

Conclusion :

En utilisant des images photographiées à des moments différents, la déformation de la pente peut être calculée avec le logiciel. Il change la méthode de surveillance traditionnelle pour utiliser la photogrammétrie numérique à courte portée pour surveiller la stabilité de la pente et réalise une surveillance rapide et de haute précision, réduisant considérablement le travail sur le terrain, diminuant l'intensité du travail, améliorant la productivité et fournissant une base scientifique au traitement et à la conception de la pente. [41]

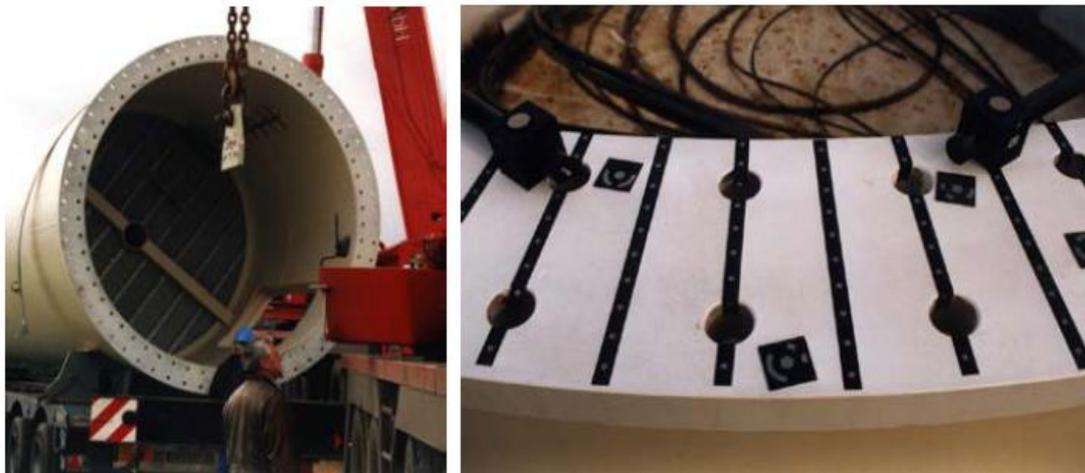
2.4. Industrie aérospatiale :

- Mesure d'antennes paraboliques et de miroirs.
- Contrôle de l'assemblage des composants
- Inspection des gabarits d'outillage
- Simulations spatiales.
- Mesure de forme optique
- Enregistrement et analyse des tests de sécurité automobile
- Calibrage du robot
- Systèmes d'assistance à la conduite
- Mesure des sections de navire
- Contrôle de forme des pièces de navire.

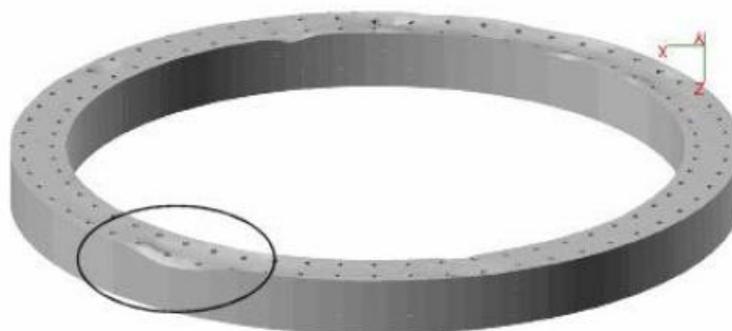
Centrales éoliennes :

Mesure des trépieds d'éoliennes et des moyeux de pales de rotor :

Le contrôle de la planéité et de la rondeur de la base du trépied de turbine (tour de support) se fait directement sur site. Cela permet de garantir que la turbine est assemblée conformément au plan. La mesure se fait par photogrammétrie hors ligne en utilisant un réseau multi-images qui fournit des coordonnées tridimensionnelles de cibles fixées à la surface de la bride du trépied. La précision typique est d'environ 0,1 mm pour un diamètre de base allant jusqu'à 4,5 m.[12]



a) Cibler la bride d'un trépied d'éolienne



b) Analyse de forme de la base du trépied montrant les zones de défauts

Figure 100: Enregistrement photogrammétrique des trépieds d'éoliennes (AICON). [12]

Industries aéronautiques et spatiales :

Les applications photogrammétriques dans l'industrie aérospatiale se distinguent par des spécifications de précision extrêmement élevées pour les très grands objets. Les spécifications typiques des précisions relatives sont comprises entre 1 : 100 000 et 1 : 250 000 ou plus. Dans les années 80, les caméras analogiques grand format, associées aux techniques de réseau et aux comparateurs numériques précis, étaient déjà utilisées avec succès. Depuis que les appareils photo numériques à haute résolution sont devenus disponibles, un certain nombre d'applications pour la photogrammétrie industrielle (automatisée) ont été développées. Voici des exemples de domaines d'application[12] :

- Mesure des antennes paraboliques
- Mesure de grands gabarits d'outillage et de jauges mécaniques
- Contrôle de production de gros composants et interfaces d'assemblage
- Simulations spatiales



a) Contrôle périodique d'un gabarit d'outillage à l'aide Rollei LFC et GSI CRC-1 caméras film



b) Mesure de l'interface du fuselage de l'A380 avec la caméra numérique métrique GSI INCA

Figure 101 : Mesure photogrammétrique des gabarits et composants d'aéronefs (Airbus). [12]



a) Système en ligne sur plateforme instable



b) Mesure manuelle des points à vérifier

Figure 102 : Mesure photogrammétrique en ligne dans la construction aéronautique (GDV, Airbus). [12]

Figure 102 montre l'application de la photogrammétrie en ligne au contrôle de processus dans la fabrication d'aéronefs. Ici, deux caméras sont montées sur une plate-forme instable, c'est-à-dire que leur orientation relative n'est pas constante. Cependant, l'orientation extérieure est continuellement mise à jour par la mesure de cibles codées à des emplacements fixes autour de la porte de l'avion, qui est le composant mesuré. La mesure simultanée d'un palpeur placé manuellement à des points critiques autour de la porte fournit les coordonnées 3D du point de contact dans le même système de coordonnées. La précision de mesure réalisable est de $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} / \text{m}$. [12]

Industrie automobile :

Voici une sélection de zones où la photogrammétrie peut être appliquée[12] :

- Installation de cellules de production et d'installations d'assemblage
- Mesure de surface de modèles de conception (rétro-ingénierie),
- Mesure de carrosserie dans une soufflerie
- Mesure de la déformation dans les essais de torsion et de sécurité automobile
- Systèmes d'assistance à la conduite
- Contrôle des machines de production



a) Photogrammetric reference point measurement



b) Scan de surface par projection de franges



c) Points de référence et analyses de surface individuelles



d) Complete model from merged individual scans

Figure 103: Modélisation 3D d'une carrosserie (GOM). [12]

Tests de sécurité automobile :

Les enquêtes typiques dans les tests de sécurité automobile comprennent :

- Les collisions frontales et latérales,
- Protection des piétons,
- Analyses de déformation (compartiment moteur, structures du toit et des fenêtres, plancher).

Figure 104 montre des extraits d'une séquence d'images utilisée pour les tests d'impact à la tête. Ils ont été réalisés à l'aide d'une NAC HiDcam avec une fixation de miroir stéréo. L'objectif est de mesurer la profondeur de pénétration de l'impact de la tête sur le capot (capot). Les trajectoires et les orientations de la tête d'impact peuvent être déterminées dans un système de coordonnées global à partir des ensembles de points 3D mesurés photogrammétriquement. [12]

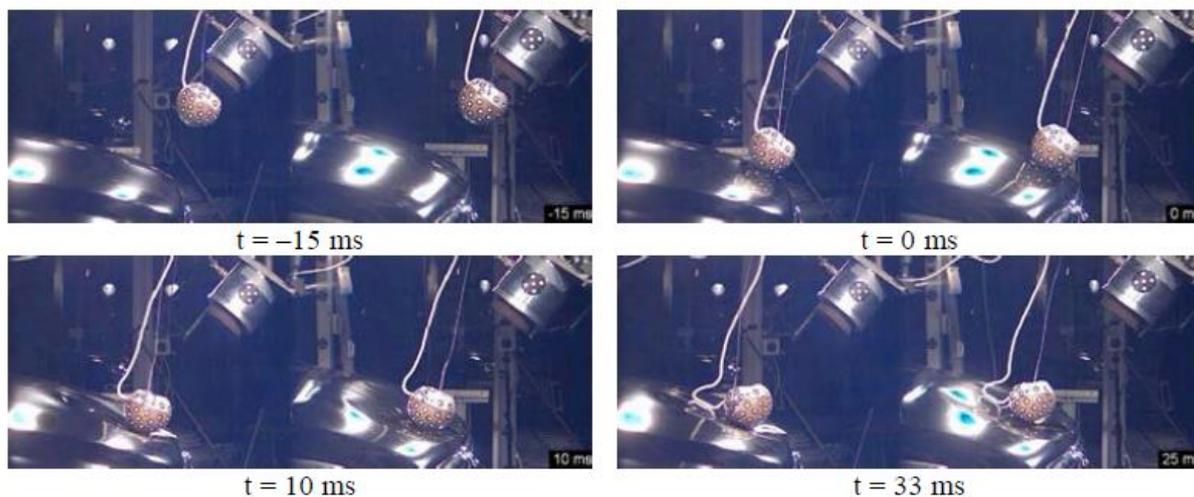


Figure 104: Séquence d'images stéréo d'un test de choc à la tête (Volkswagen). [12]

Déformations de la carrosserie :

Figure 105 illustre un essai de torsion de carrosserie. Dans ce cas, des bandes de cibles rétro réfléchissantes sont placées le long de profils sélectionnés et imagées de tous les côtés à l'aide d'un appareil photo numérique. Après la définition interactive d'un point de départ, toutes les cibles sur une bande peuvent être mesurées automatiquement. Une précision de 0,1 mm peut être obtenue ici dans l'espace objet. [12]

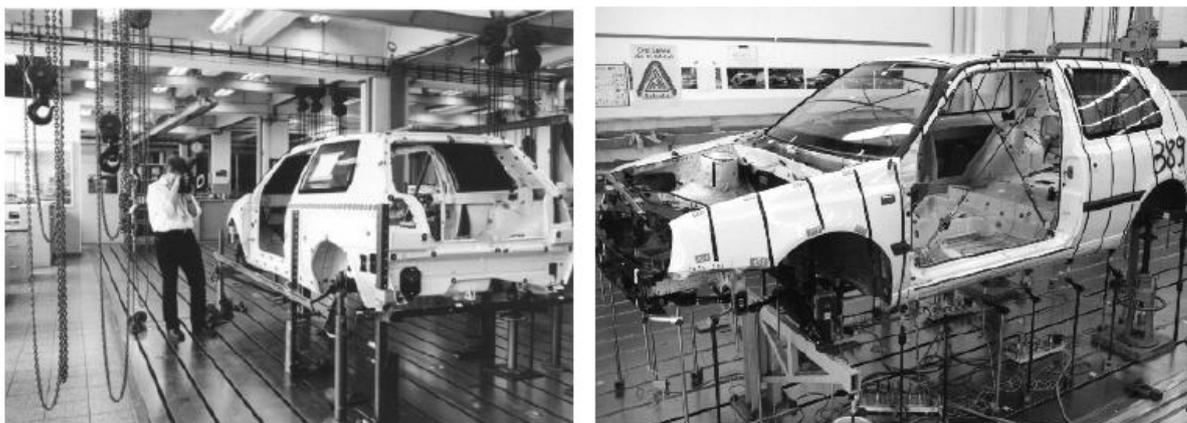


Figure 105: Mesure photogrammétrique de cibles pour une expérience de torsion (Volkswagen). [12]

Industrie de la construction navale :

Les tâches photogrammétriques dans la construction navale comprennent les suivantes[12] :

- Mesure des tôles d'acier et de leur orientation sur des machines à couper le métal,
- Mesure des sections de navire,
- Mesure des fenêtres, coque et ferrures,
- Contrôles de circularité sur les sous-marins.

Les applications de métrologie dans l'industrie de la construction navale se caractérisent par[12] :

- Mesure de grands objets (> 30 m).
- Accès restreint.
- Vibrations et conditions environnementales défavorables.

Figure 106 illustre le processus d'un exemple de mesure photogrammétrique dans la construction navale est la détermination du retrait lors du soudage de grandes pièces en acier. Pour des tailles de composants typiques de 10 à 12 m, le retrait lors du soudage peut atteindre plusieurs mm et est pris en compte dans le plan de construction. [12]

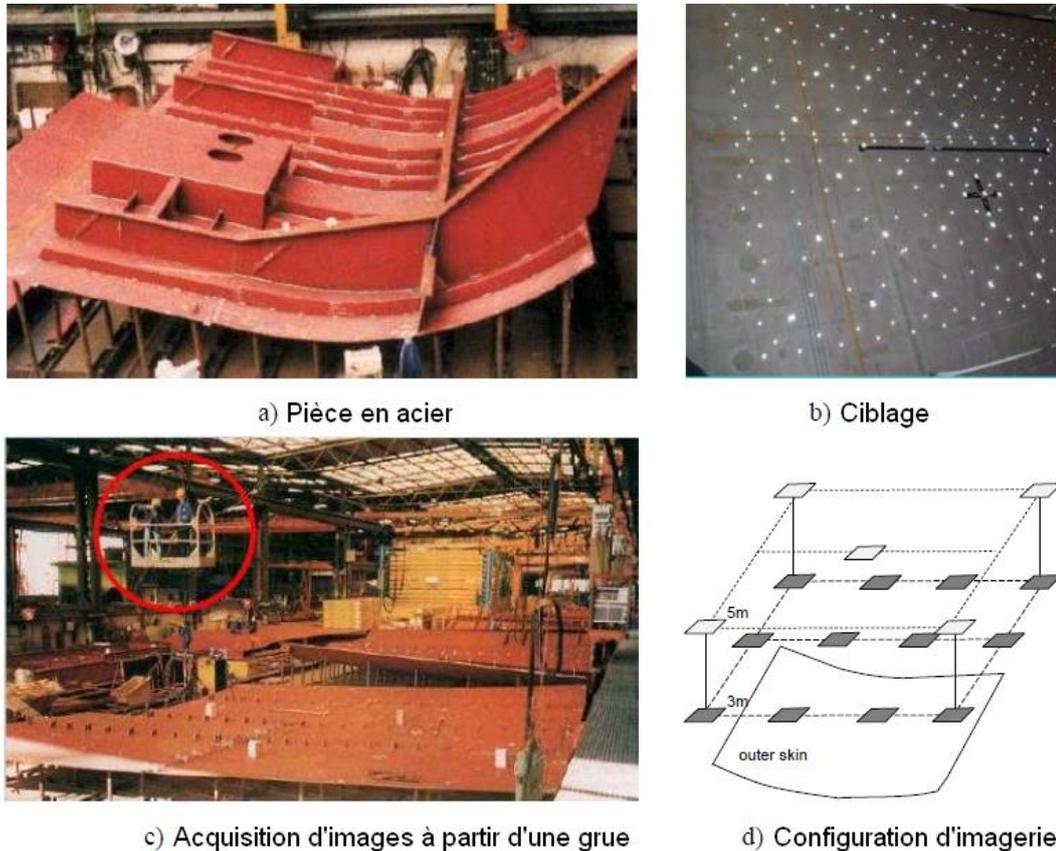


Figure 106: Acquisition photogrammétrique du retrait de soudage (AICON)

2.5. Médecine :

Domaine d'application :

- Mesures dentaires
- Déformation vertébrale
- Chirurgie plastique
- Neurochirurgie
- Analyse microscopique
- Chirurgie assistée par ordinateur (navigation)

En médecine, la photogrammétrie est principalement utilisée pour mesurer des parties du corps, par exemple :

- Préparer et réaliser des opérations (navigation)
- Pour construire des prothèses et des implants
- En chirurgie plastique

- Études en mouvement
- Dans la thérapie des déformations osseuses et vertébrales
- Suivre la croissance

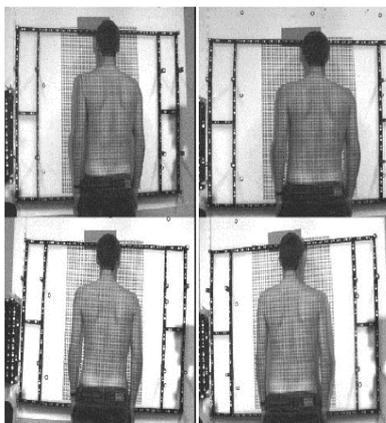


Figure 108 : Configuration d'image multiple pour le dos. [12]

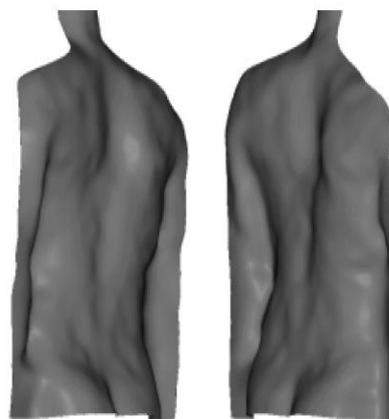


Figure 107 : Visualisation 3D de la mesure du dos humain (Gäbel 1993). [12]

Figure 108 montre un ensemble de quatre images pour la mesure du dos. Le patient est positionné devant un champ spatial de points de référence et une grille cible est projetée sur la surface du dos du patient. Tout cela est imagé par quatre caméras synchronisées. La correspondance des moindres carrés est utilisée pour la reconstruction de surface. Le modèle tridimensionnel résultant peut être analysé pour les asymétries. Figure 107. Les caractéristiques du processus photogrammétrique sont [12] :

- Mesure sans contact évitant le stress du malade.
- Temps de mesure court (dixièmes de seconde).
- Aucune exposition aux rayonnements.
- Convient également aux nourrissons et aux enfants.
- Mesure ultérieure et comparaison diagnostique dans le temps.



a) Mesure d'objets point par point (AXIOS 3D)



b) Projection et localisation d'un spot laser (BrainLab)



c) Système en ligne pour utilisation dans les blocs opératoires (Smith & Nephews)

Figure 109 : Systèmes à double caméra pour applications médicales. [12]

Figure 109 montre des exemples de tels systèmes en ligne à double caméra avec palpation tactile point par point. Ceux-ci peuvent non seulement utiliser des adaptateurs de cible avec des pointes de palpation, mais également les outils réels utilisés dans les opérations, s'ils sont équipés de cibles appropriées Figure 110. [12]

Figure 110 montre un exemple où un localisateur fixé à un os est mesuré, conjointement avec un localisateur mobile monté sur un robot chirurgical. De cette manière, il est possible de compenser tout mouvement des jambes. [12]



a) Outils chirurgicaux ciblés (BrainLab)



b) Robot chirurgical (Plus Orthopédie)

Figure 110 : Outils chirurgicaux avec points de référence spatiaux. [12]



Figure 111 : Plan de mise en œuvre pour l'insertion d'une articulation de la hanche (Plus Orthopedics). [12]

Figure 111 montre un exemple de l'insertion prévue d'une articulation de la hanche conçue par CAD dans une image CT. À l'aide de points de navigation anatomiques (points de repère), la transformation entre le scanner et l'os réel peut être générée pendant l'opération.[12]

2.6. Risques majeurs :

Domaine d'application :

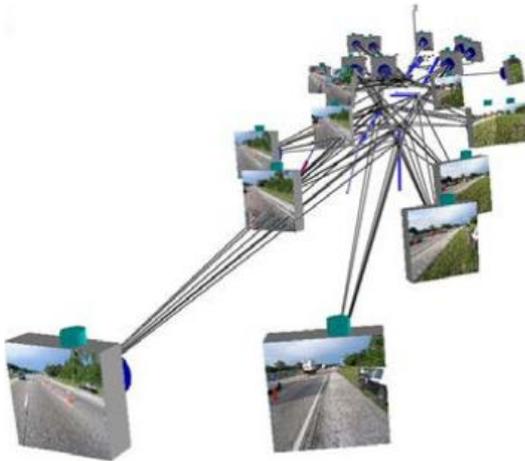
- Enregistrement des accidents
- Mesure de la scène du crime
- Registres juridiques
- Mesure des individus.

Enregistrement des accidents :

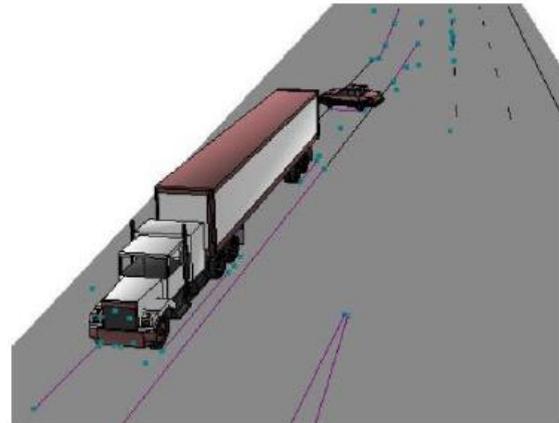
Une situation de mesure typique sur le site d'un accident est illustrée à Figure 114. La scène de l'accident a été enregistrée avec un appareil photo amateur de 7 mégapixels, l'Olympus C7070WZ. La zone couverte par le réseau de caméras et les points objets ont une étendue de 80 m et une variation de hauteur maximale de seulement 2 m. Les restrictions d'imagerie sur site conduisent à des intersections de rayons largement horizontales et étroites qui exigent des méthodes d'orientation d'image particulièrement robustes. Le logiciel iWitness (Photometrix) a été utilisé pour orienter le réseau de 22 images et produire des dessins et des modèles CAD. La précision dans l'espace objet était d'environ 3 cm. [12]



a) Exemples d'images de mesure



b) Configuration d'imagerie



c) Modèle CAD dérivé

Figure 112: Enregistrement d'accident photogrammétrique (Photometric). [12]

Enregistrement de la scène du crime :

Figure 113 montre le résultat d'une reconstruction de la scène du crime avec modélisation complète de la scène locale (a), superposition du modèle CAO et détail de la photo (b), trajectoires de pulvérisation de sang (c) et les emplacements possibles des individus impliqués (d). La scène dans ce cas a été enregistrée à l'aide d'un appareil photo numérique Nikon D700. Elcovision 10 (PMS) et AutoCAD (Autodesk) ont été utilisés pour l'analyse et la modélisation photogrammétriques. La précision de la mesure était de l'ordre du mm. [12]

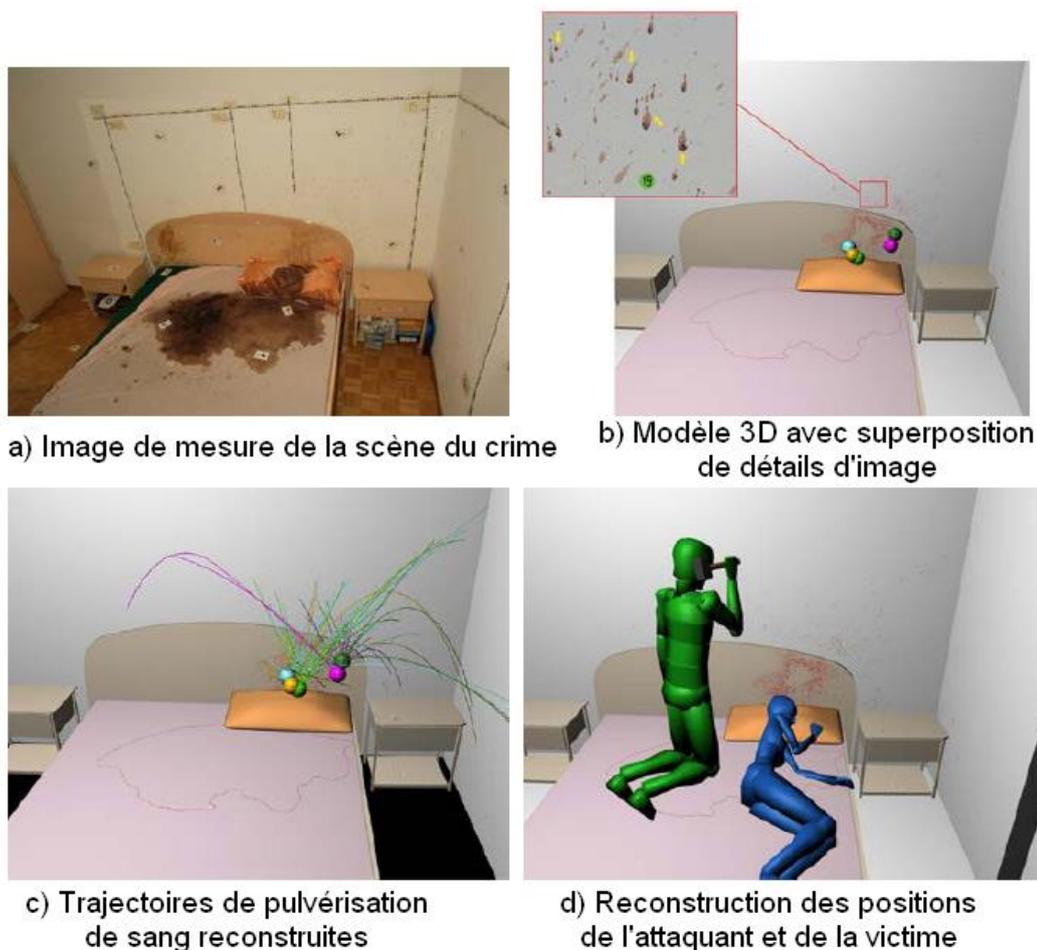


Figure 113: Casier judiciaire photogrammétrique (Institut für Rechtsmedizin, Université de Berne). [12]

2.7. Ecologie :

État de l'art et potentiel d'application dans la gestion forestière en Croatie :

Une étude de refinance [42] établie en 2011 par le journal South-east European forestry, les chercheurs Balenović, Ivan Seletković, Ante Pernar, Renata Marjanović, Hrvoje Vuletić, Dijana Paladinić, Elvis Kolić, Jelena Benko, Miroslav ont utiliser un appareil photo aérien et les logiciels PHOTOMOD Lite et Global Mapper Pour découvrir État de l'art et potentiel d'application dans la gestion forestière en Croatie.

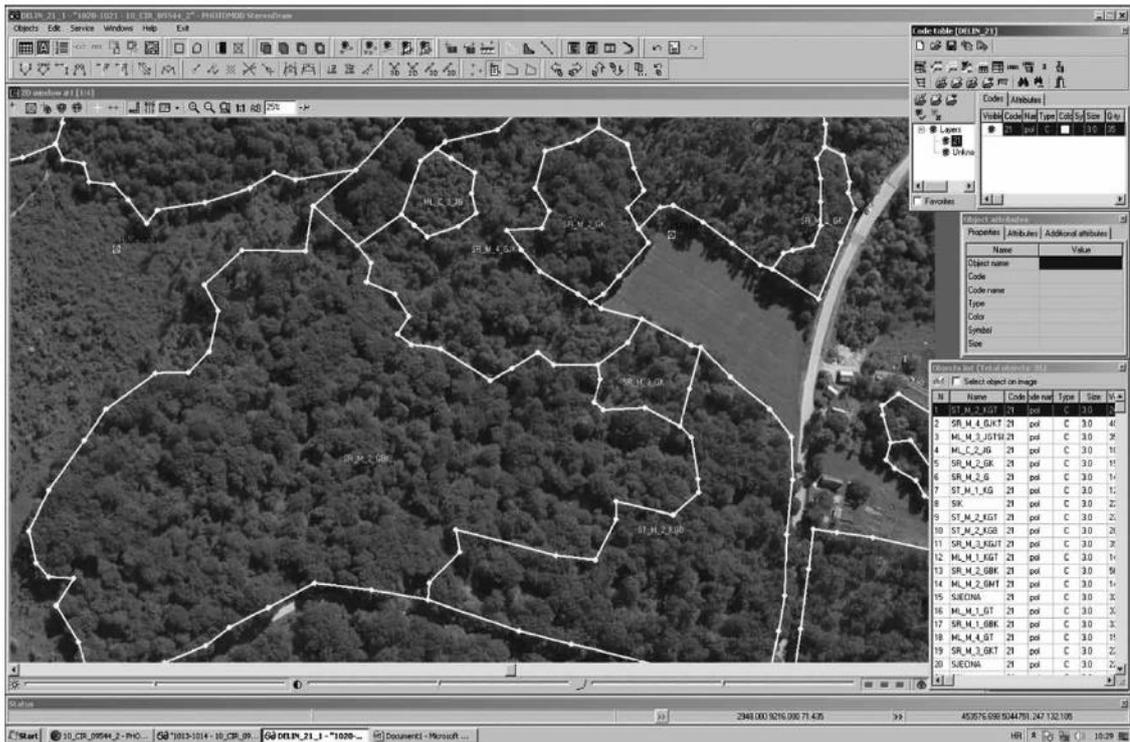


Figure 114: Un exemple de strates délimitées sur des images aériennes numériques de GSD 10 cm montrées dans la fenêtre 2D du module Stereo Draw à une atténuation de 25%. [42]

Category	Subcategory	Sub-category code
Cover	High forest – Young	HF-Y
	High forest - Middle-Aged	HF-MA
	High forest – Old	HF-O
	Harvested Area	HA
	Degraded (shrub)	DEG
	Land In Succession	SUC
	Land Without Vegetation	WV
Mixture	Pure	P
	Mixed	M
	Not applicable	NA
Canopy closure	Complete (91-100%)	1
	Incomplete (76-90%)	2
	Rare (50-75%)	3
	Broken (< 50%)	4
	Not applicable	NA
Main tree species	<i>Quercus petraea</i>	QP
	<i>Fagus sylvatica</i>	FS
	<i>Carpinus betulus</i>	CB
	<i>Alnus glutinosa</i>	AG
	<i>Populus sp.</i>	POP
	Other	OTH
	Not applicable	NA

Tableau 6 : Catégories de classification des forêts et des terres forestières pour la photo-interprétation d'images aériennes numériques. [42]

Reconstruction 3D d'une toile d'araignée :

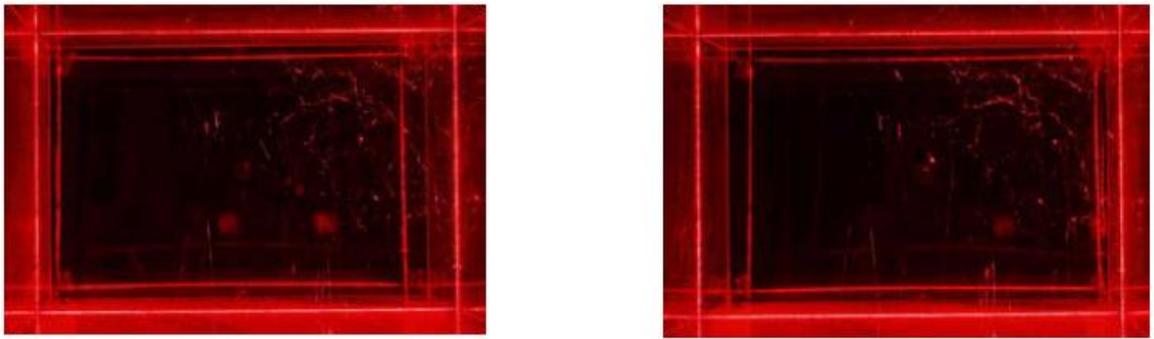


Figure 115 : Images stéréo pour l'enregistrement photogrammétrique d'une toile d'araignée (TU Darmstadt). [12]

Figure 115 montre l'une des paires d'images stéréo dans lesquelles la toile d'araignée est éclairée par le plan de lumière laser. Une analyse stéréo utilisant le logiciel ERDAS LPS produit un modèle CAO 3D contenant les points et les connexions constituant la bande (Figure 116a). Pour produire le modèle artistique (créé par l'artiste Tomas Saraceno, (Figure 116b) ce n'est pas la précision absolue qui compte mais l'exhaustivité du modèle.[12]

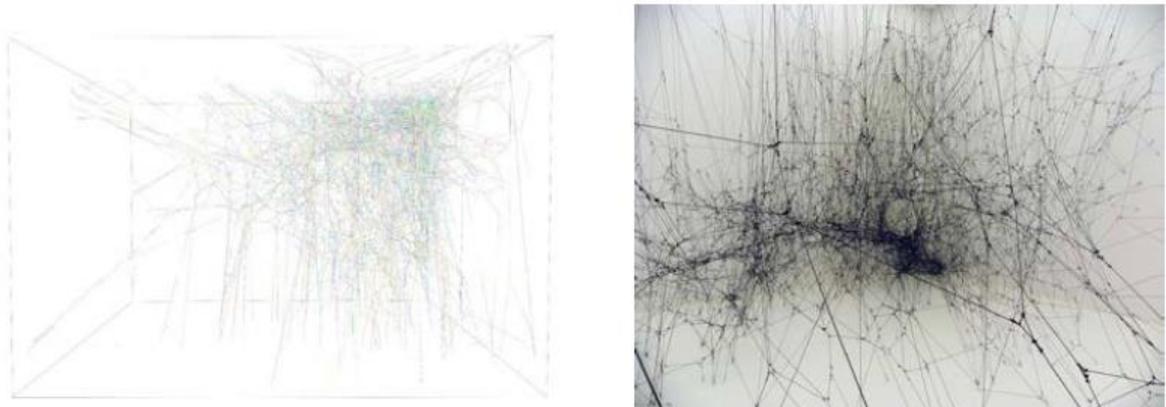


Figure 116 : Reconstruction de la toile d'araignée. [12]

Sciences de la Terre :

Figure 117 montre la surface de l'échantillon d'essai avant la pluie artificielle (a), après 20 minutes de pluie simulée (b) et après 65 minutes (c). On peut voir qu'après 20 minutes, le ruissellement de surface a créé un modèle de drainage qui devient plus établi avec l'augmentation de la durée des précipitations. L'interaction naturelle rend le modèle de drainage plus efficace avec le temps. [12]

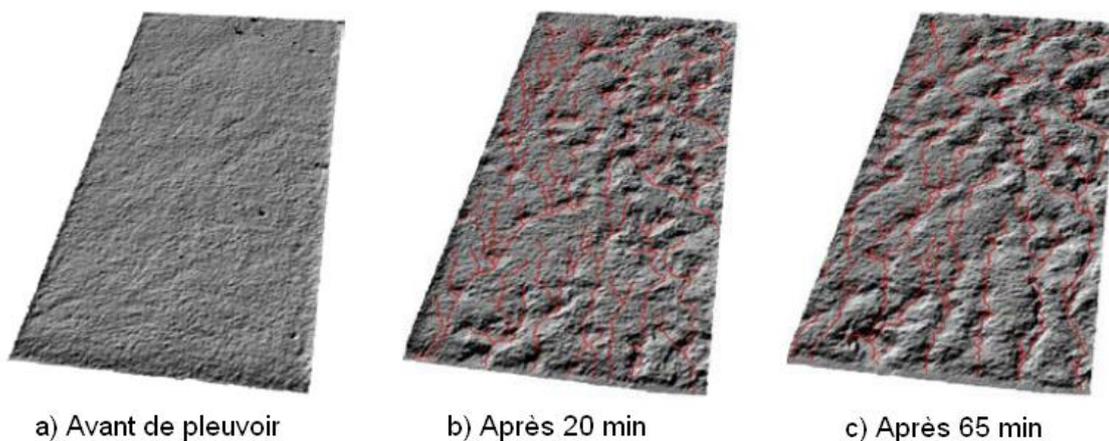


Figure 117: Modèle de hauteur et modèle de drainage générés par photogrammétrie (Université de Berne). [12]

2.8. Détection des mouvements :

Surveillance des mouvements des glaciers :

Figure 117 montre la caméra en position et l'une des images. Les changements de hauteur sur une période de 24 heures en un point sur le glacier près du front du glacier, tels que calculés à partir de la séquence d'images, sont indiqués sur la Figure 119. Ici, le glacier montre une corrélation presque parfaite avec la courbe des marées. Cela prouve que le front du glacier flotte sur le fjord. L'influence des marées s'estompe à environ 1 km derrière le front. À partir de là, la position de la ligne de mise à la terre peut être déterminée (Figure 120). Les résultats de cette mesure photogrammétrique terrestre constituent la base des études glaciologiques du glacier Jakobshavn Isbrae. [12]

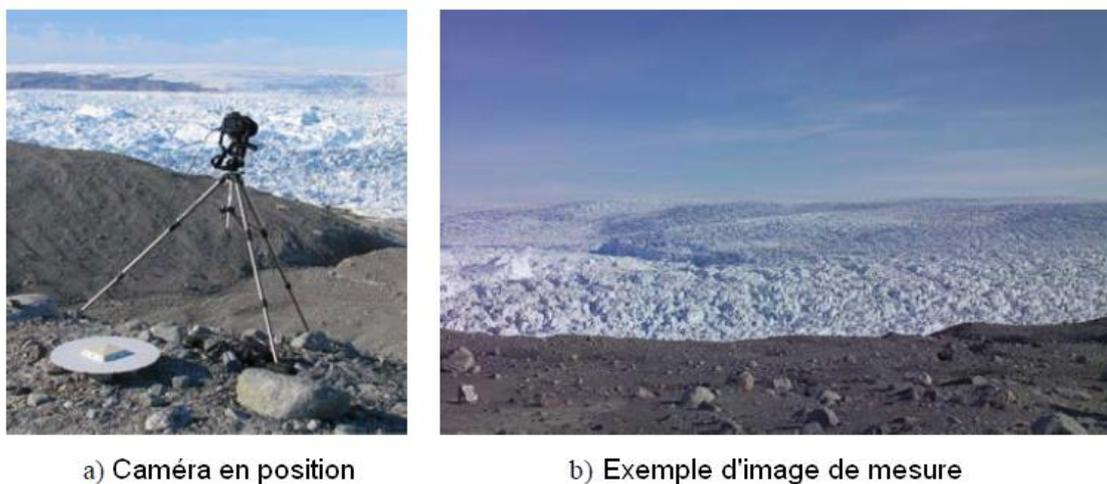


Figure 118: Enregistrement photogrammétrique du mouvement des glaciers (IPF TU Dresden). [12]

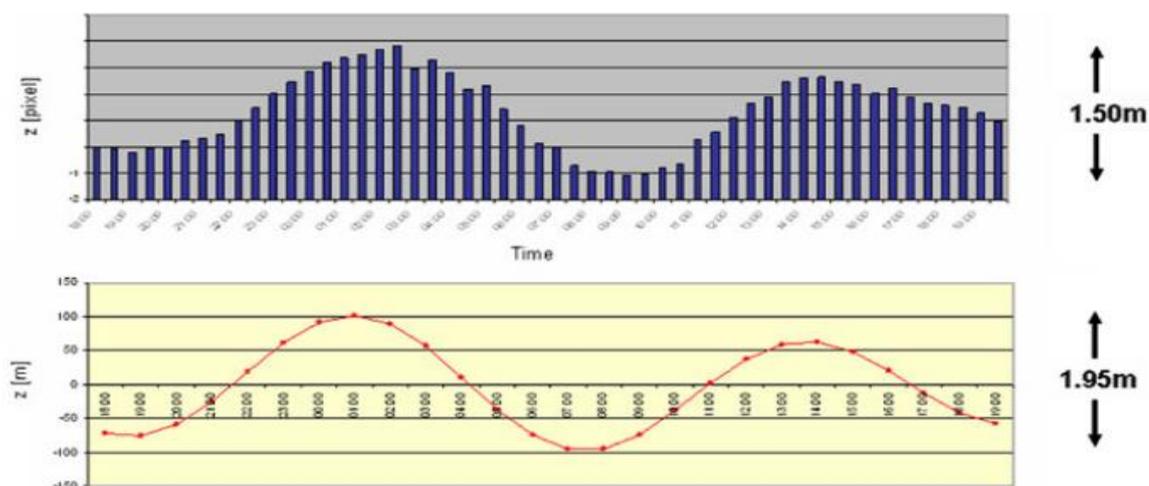


Figure 119: Changements d'altitude calculés à l'emplacement d'un glacier sur 24 heures (diagramme supérieur) et courbe de marée correspondante (diagramme inférieur) (IPF TU Dresden). [12]

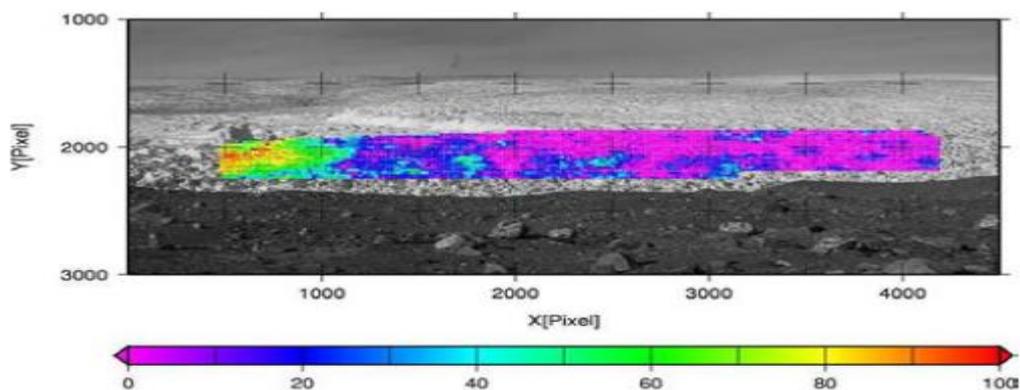


Figure 120: Participation de la composante mouvement vertical des glaciers avec l'amplitude des marées (IPG / IPF TU Dresden). [12]

2.9. L'agriculture :

Application de la photogrammétrie à gamme proche pour l'estimation de l'indice de zone feuille (LAI) leaf area index dans une culture de tomate en serre :

Matériaux et méthodes :

En utilisant PhotoModeler avec lequel une image CAD 3D de la surface de la canopée de la tomate peut être obtenue. De cinq à 14 photographies convergentes prises avec un appareil photo numérique Olympus C5060 (5,0 mégapixels). [43]

Une fois obtenus les points tridimensionnels au moyen d'une photogrammétrie de plus près, ils sont importés dans RapidForm et le processus de triangulation a été réalisé. Assez souvent, il est nécessaire d'éditer le maillage pour couvrir certains trous ou pour créer un nouveau point

dans les zones manquant d'informations. Ainsi, les modèles 3D finaux et ses volumes «réels» ont été obtenus (Figure 121). [43]

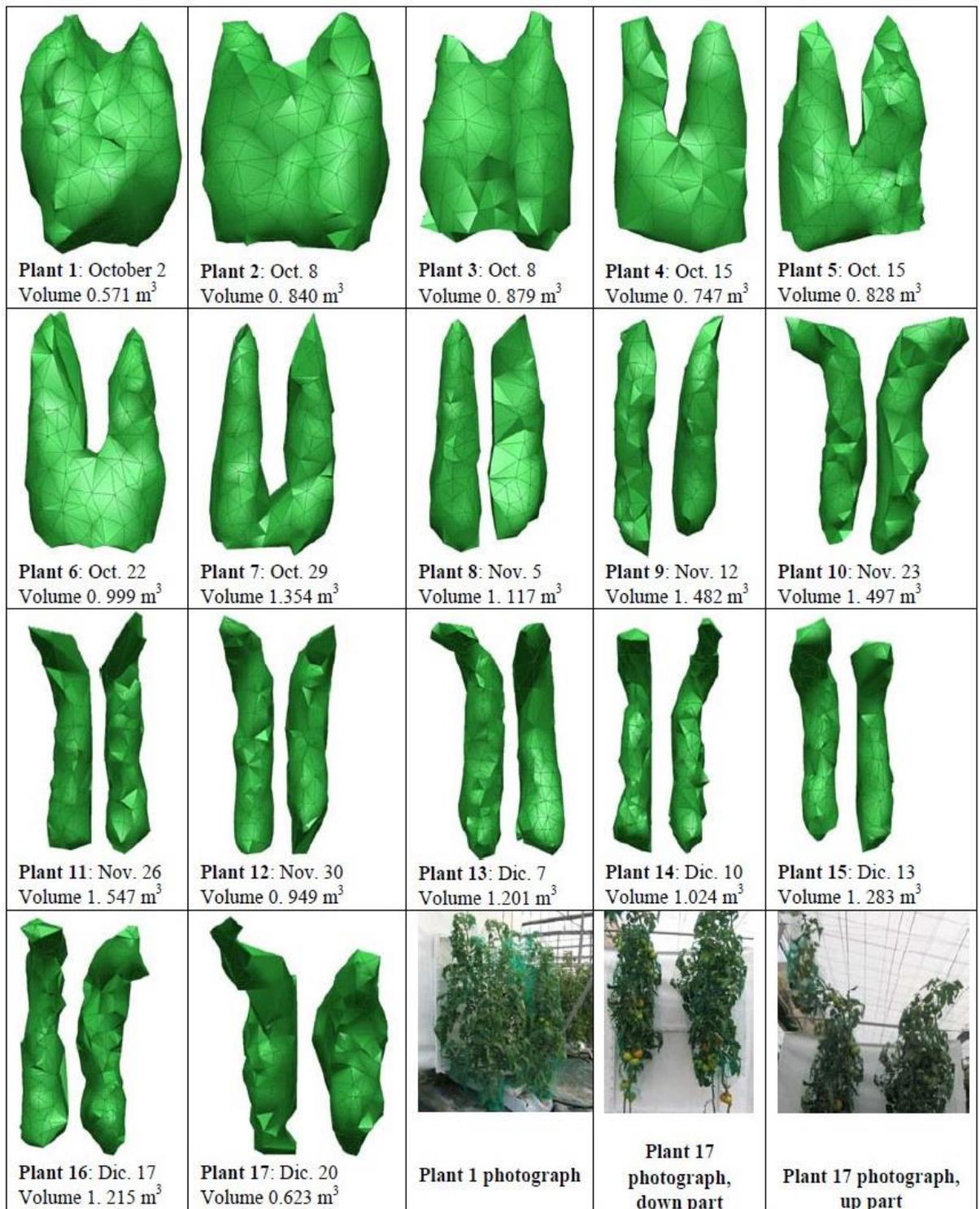


Figure 121: Modèles 3D de 17 plants de tomates obtenus par photogrammétrie à courte portée, volume et quelques photographies de plantes réelles. [43]

Conclusion :

Dans ce travail, une méthodologie basée sur la photogrammétrie à courte portée a été appliquée pour obtenir, avec la plus grande précision possible, la surface extérieure des plants

de tomates à l'intérieur d'une serre. Les résultats obtenus indiquent la possibilité de représenter la surface environnante d'un plant de tomate avec environ 400 points 3D et de calculer, de manière précise, le volume de la canopée. [43]

Bien que la méthode proposée soit parfaitement applicable sur le terrain, elle s'avère très coûteuse en temps. Les informations de volume obtenues par photogrammétrie à courte portée ont été utilisées pour trouver une méthode manuelle simple de mesure du volume pour la surface environnante de la canopée de tomate, qui s'ajuste de la meilleure façon possible à cette information. [43]

La génération d'un modèle prédictif et empirique pour l'estimation non destructive du LAI dans les plants de tomates sous serre était le principal objectif de cette communication. Ce modèle était basé sur le volume et la densité des plants de tomates, qui sont estimés à partir de mesures du monde réel en utilisant respectivement la photogrammétrie à courte portée, les outils de modélisation 3D et l'analyse de photographies numériques. Le modèle empirique LAI a présenté un coefficient de détermination de 82,71%. [43]

3. Exemples d'application en génie civil :

- Mesure de grands chantiers de génie civil
- Mesures de déformation
- Mesure des tuyauteries et des tunnels
- Mesure de la route et de la voie ferrée



Figure 122 : génie civil. [12]

3.1. Auscultation des ponts :

3.1.1. Modélisation photogrammétrique pour l'inspection et l'assainissement des ponts :

Exemple réf [44] est fait par les chercheurs **Chan, Brodie - Saul, Ian - Pettigrew, Tim - Anstice, Daniel** en Australie

Martiales utilisé : drone (caméra bottom-mounted high définition qui a produit des images avec une résolution native de 6000 x 4000 pixels.)

Les images ont été capturées séquentiellement avec plus de 75% de chevauchement entre les images, a été capturé à une distance d'environ 30 m pour produire un modèle de nuage de points à basse résolution.

Cette imagerie à courte portée a été capturée à une distance comprise entre 2 et 5 m avec des passages réalisés à des hauteurs et des angles variables dans le sens du déplacement. Cela est généralement illustré par la Figure 123. 2000 photos ont été collectées à des distances variables



Figure 123 : Trajectoires de vol prévues et réelles. [44]

Logicielle utilisée : **Agisoft**

Les résultats obtenus :

Le modèle photogrammétrique 3D a été produit, comme illustré ci-dessous sur la Figure 124.



Figure 124 : Reconstruction complète du pont. [44]

Conclusion :

- 1) L'utilisation de la modélisation photogrammétrique permet une plus grande efficacité pour la collecte et la conservation des données, tout en réduisant les coûts associés aux rapports d'inspection actuels.
- 2) Permet une plus grande contextualisation des problèmes et peut améliorer les décisions relatives aux réparations éventuellement nécessaires.
- 3) Peut être appliqué par des inspections successives pour créer une accumulation historique de l'état de la structure, qui peut être revue tout au long du cycle de vie pour fournir une compréhension plus approfondie de l'état actuel.

4) Lorsqu'il est appliqué aux grands projets de renouvellement des immobilisations, il est possible de réduire considérablement le risque pour toutes les parties concernées, du concepteur à l'entrepreneur en réparation. Cela se traduit par des réparations plus efficaces, une réduction des risques de retards et de dépassements budgétaires dus aux variations.

3.1.2. Application de la photogrammétrie à la surveillance des ponts :

D'après les études décrites ici, on peut dire que la photogrammétrie peut être utilisée dans la surveillance de grandes structures. Il a également été prouvé qu'une grande précision peut être obtenue dans les tests de laboratoire; dans les tests de connexion en acier, une précision moyenne de 0,1 mm a été obtenue dans les trois directions de l'espace.[45]

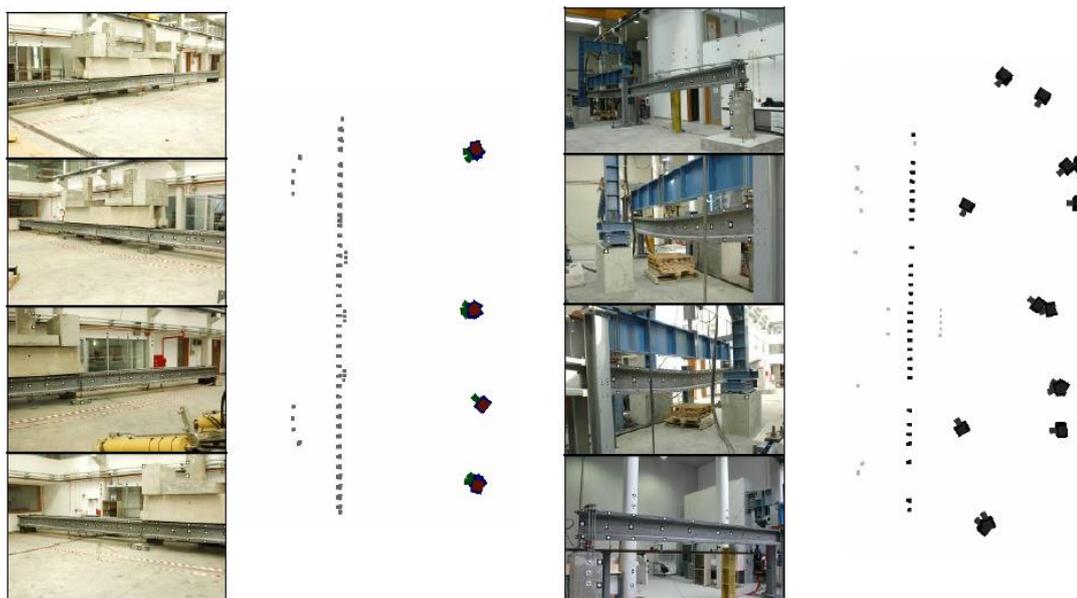


Figure 125 : Test de fluage; et test de défaillance.[45]

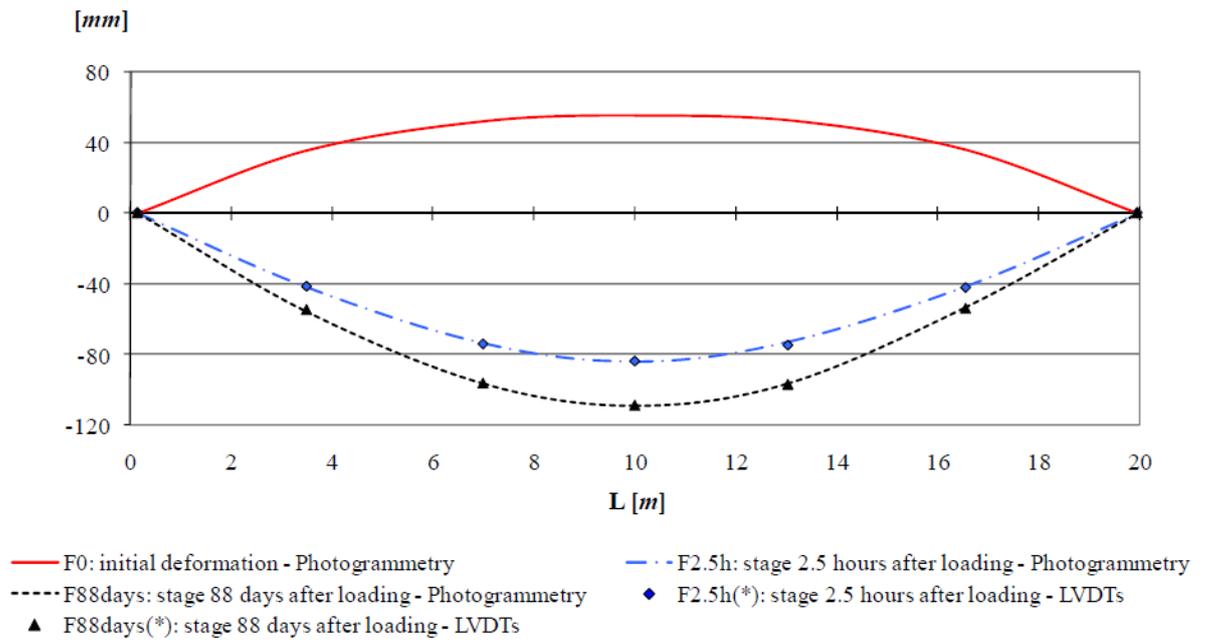


Figure 126 : Résultats photogrammétriques par rapport aux LVDT pour le test de fluage.[45]

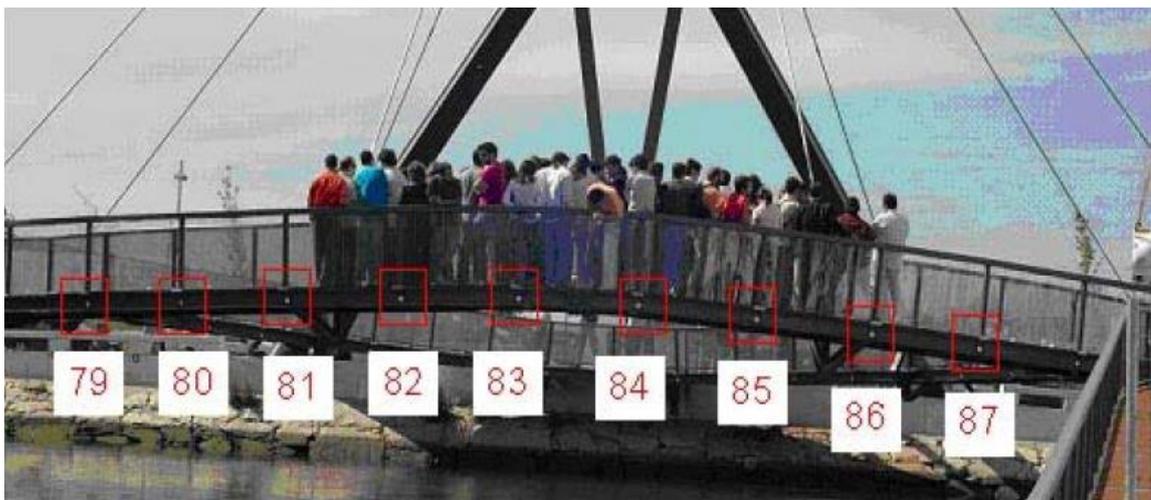


Figure 127 : contrôlé les cibles. [45]

3.1.3. Reconstruction 3D de ponts en béton existants à l'aide de méthodes optiques :

Une étude [46] établie en 2019 par Département de génie civil, environnemental et des ressources naturelles, Université de technologie de Luleå, Luleå, Suède; Nord Institut de recherche — NORUT, Narvik, Norvège, les chercheurs **Popescu, Cosmin - Täljsten, Björn -Blanksvärd, Thomas -Elfgren, Lennart** ont utilisé un appareil photo de type Figure 128 Pour le suivi de déplacement vertical et horizontale en moment de passages des véhicules sur le ponts. Le teste a été établi sur Cinq ponts à savoir Påunakbäcken bridge, Pahtajokk bridge, Juovajokk bridge, Kedkejokk bridge, Kallkälleväagen bridge Aux Suède.

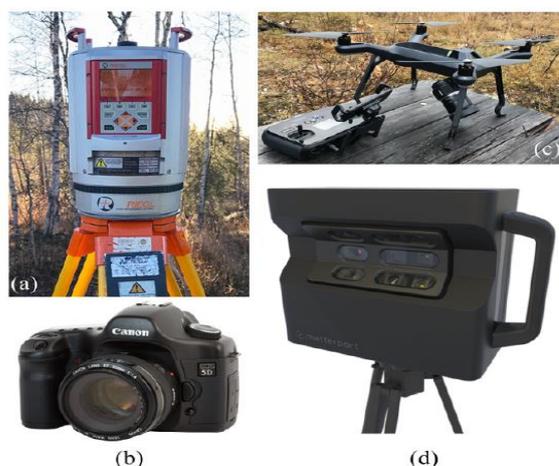


Figure 128 : Matériel d'acquisition de données. (a) Balayage laser terrestre — RIEGL VZ-400, (b) CRP — Canon EOS 5D, (c) véhicule aérien sans pilote — Balayage de site 3DR et (d) balayage infrarouge — Matterport Pro2 3D. [46]

Ci-dessous quelques reconstitution 3D[46] des ponts par photogrammétrie terrestre.



Figure 129 : Modèles 3D du pont de Pääunakbäcken. [46]



Figure 130 : Modèles 3D du pont Pahtajokk . [46]



Figure 131 : Modèles 3D du pont Juovajokk. [46]



Figure 132 : Modèles 3D du pont Kedkejokk. [46]



Figure 133 : Modèles 3D du pont Kallkälleväagen. [46]



Figure 134 : Visualisations de nuages de points de la culée du pont de Pahtajokk. [46]

Ce travail nécessite la prise de photos de plusieurs angles de vue. Avec conservation du recouvrement. Le nombre des photos dépasse les 40 pour un petit ouvrage qui ne dépasse pas les 10m linéaire. Cette reconstitution fidèle nous permet de faire le diagnostic sur les photos directement (Figure 135).

Le résultat obtenu été positif, on peut détecter la flèche et la mesurer avec une précision millimétrique.

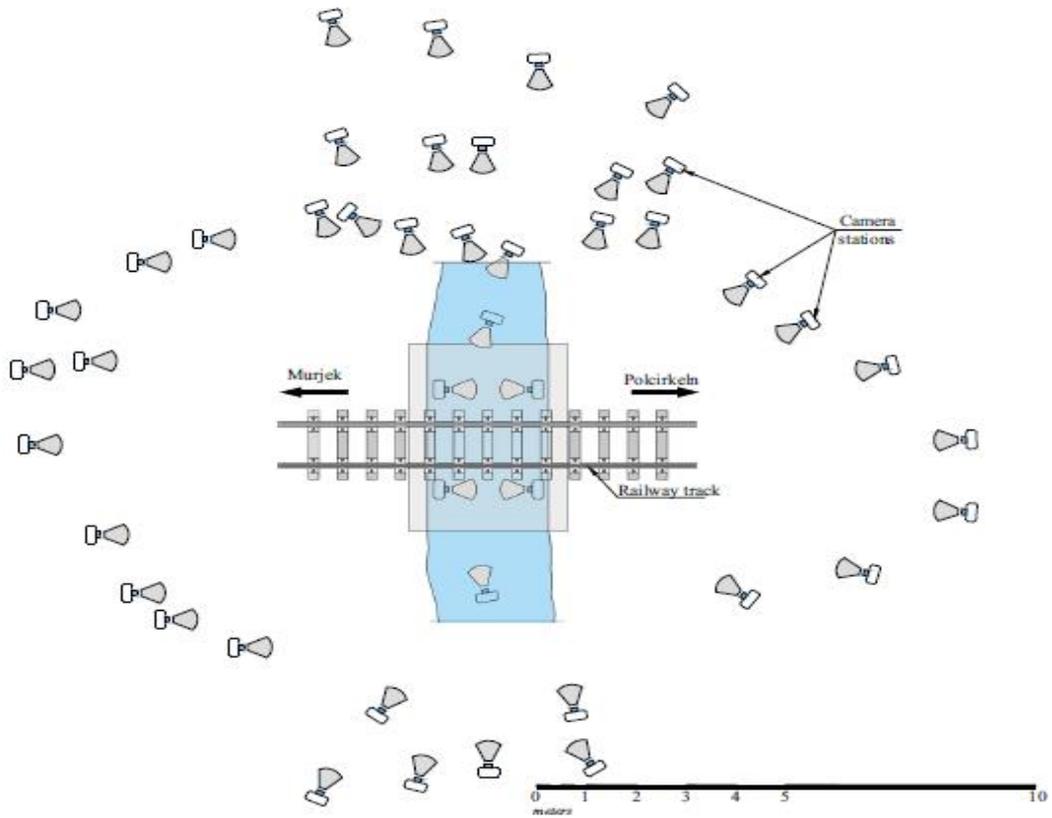


Figure 135 : Différents points de vue et triangulation de la position de la caméra résultante de Pâunakbäcken. [46]

3.1.4. Surveillance du pont à l'aide d'un appareil photo numérique : pont basé sur la photogrammétrie :

L'expérience référence [47] est fait par l'université California State University Transportation Consortium les chercheurs qui participe dans cette expérience **Yushin Ahn** , **Scott Peterson**, **Maryam Nazari** les outils utilisant Figure 137 et Figure 138 L'expérience s'est déroulée sur les trois ponts Figure 139 ont été produits les résultats suivants

Cette recherche visait à vérifier la faisabilité de la caméra pour surveiller les vibrations / estimer les vibrations du pont en présentant des indicateurs généraux tels que les amplitudes (suivant les recommandations de l'AASHTO), la fréquence, la vitesse et l'accélération. Cependant, pour une étude complète des vibrations, 1) le type et la vitesse des véhicules, 2) le poids du véhicule et 3) les modèles de vibration induits par plusieurs véhicules doivent être suivis. [47]

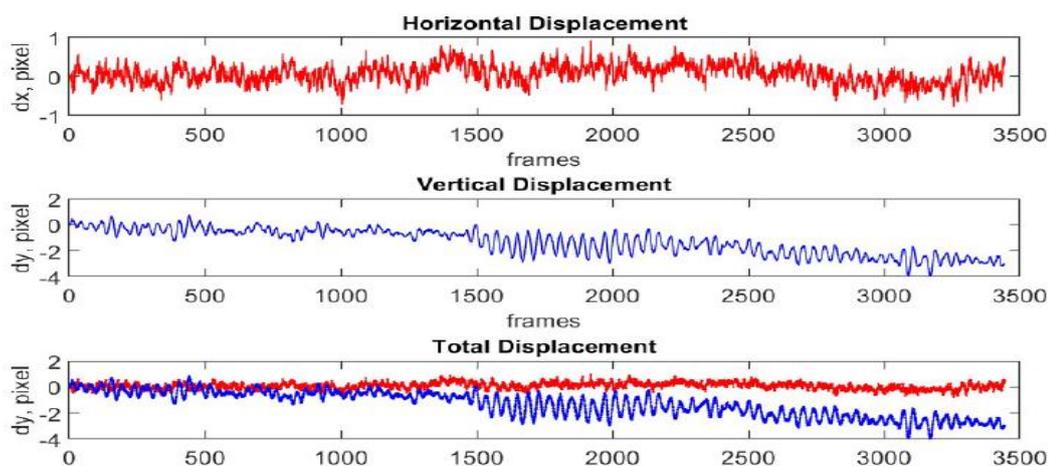


Figure 136 : Déplacement horizontal et vertical des pixels pour le pont 1. [47]



Figure 137 : la caméra utilisée dans cette étude SONY Cyber-Shot RX10 IV. [47]



Figure 138 : static GPS. [47]



Figure 139 : (A) Vue d'ensemble du site, (B) Pont 1, Pont routier à courte portée, (C) Pont 2, Pont routier à portée moyenne, et (D) Pont 3, Pont local à portée moyenne. [47]

3.2. Auscultation d'un barrage :

Le barrage d'Escoubous dans les Pyrénées au sud-ouest de la France, fait l'objet depuis sa mise en eau en 1954, d'une auscultation topographique classique par mesure géodésique d'une quinzaine de repères sur son parement aval, à partir d'un réseau de piliers. Ce dispositif, adapté au suivi du comportement mécanique général du barrage, est en revanche insuffisant pour la détection précoce de boursouflures localisées, phénomène qui affecte son parement aval empierré.[48]



Figure 140 : Vue d'aval du barrage d'Escoubous. [48]

Expérimentation de la technique photogrammétrique sur porteur drone :

Une expérimentation a été conduite en 2013 sur ce même barrage d'Escoubous, avec un drone multirotor hexacopteur équipé d'un appareil photo numérique à focale fixe. Le géoréférencement du relevé photogrammétrique s'est également appuyé sur le réseau géodésique du site ainsi que sur une dizaine de cibles circulaires temporaires déterminées à cet effet sur le parement du barrage. [48]

Le plan de vol comportait 6 axes de prises de vues verticales et 4 axes avec des vues obliques pour couvrir l'intégralité du parement avec un recouvrement entre photos d'au moins 80 %. Afin d'obtenir la précision maximale, la hauteur de vol a été fixée à 50 m au-dessus de la crête du barrage de manière à obtenir une taille pixel de l'ordre de 5 mm. En outre, les paramètres de calibration de la caméra ont été déterminés sur banc d'étalonnage. [48]



Figure 141: Nuage de points 3D colorisés reconstitué par photogrammétrie. [48]

Les résultats obtenus :

Les résultats prometteurs atteints avec la photogrammétrie aéroportée légère, permettent d'envisager de déployer cette technique sur d'autres ouvrages de plus grande taille. Il convient cependant de prendre garde à la présence de végétation qui reste un frein important. L'utilisation de la photogrammétrie aéroportée légère pour le suivi des ouvrages linéaires est à portée de main. L'utilisation, et l'amélioration, de la suite logicielle open-source MicMac4 dans le cadre de la thèse IGN/CNR permettra à l'ensemble de la communauté scientifique de profiter des avancées du projet. [48]

Conclusion :

Avec les développements et la miniaturisation des capteurs (caméra métriques) et le développement fulgurant des drones permettant des relevés à partir de points de vue jusque-là difficilement accessibles, la technique de la photogrammétrie présentent aujourd'hui un potentiel majeur pour l'optimisation du suivi géométrique des ouvrages. [48]

Toutefois, si ces techniques semblent faciles d'accès, l'expérience montre qu'il faut rester extrêmement vigilant quant à leur mise en œuvre pour maîtriser le niveau d'incertitude final, de surcroit pour une utilisation en auscultation et analyse comportementale. En effet, chacun des paramètres de la chaîne d'acquisition et de traitement a une influence sur le résultat final. De même, la donnée surfacique ne constitue bien souvent qu'un complément aux informations ponctuelles des techniques classiques, et n'est réellement pertinente que dans certains cas. [48]

En outre, les données surfaciques génèrent des volumes de données colossaux nécessitant des ressources informatiques très importantes. Leur essor est donc aussi lié à l'amélioration des temps de traitements. Enfin, les efforts de développements doivent également se poursuivre pour l'optimisation d'algorithmes spécifiques de détection de changement entre nuages de points. [48]

3.3. Mesure géométrique interne dans une construction

3.3.1. Mesure du toit et de la façade

La mesure des surfaces de bâtiment est utile pour les applications suivantes :

- Mesure des surfaces de façade pour le nettoyage et la peinture
- Mesure des surfaces de façade pour le calcul des quantités de matériaux de construction et d'isolation
- Mesures du toit pour le carrelage
- Simulation des modifications et des ajouts de bâtiments (par exemple couleur, maçonnerie, carreaux)
- Mesure des fenêtres et des portes
- Mesures du toit pour prévoir les panneaux solaires

Figure 142 montre le résultat de la mesure de la façade d'un immeuble. Pour cette image, les paramètres de transformation projective plane sont connus de sorte que les longueurs latérales de la façade, ainsi que l'emplacement et les surfaces des fenêtres et autres objets à l'intérieur de la façade, peuvent être déterminés. Dans ce cas, les coefficients de transformation sont calculés à l'aide des quatre points d'angle d'une fenêtre de dimensions connues. Cela entraîne des erreurs d'extrapolation sur les bords de l'image. [12]



Figure 142 : Mesure de façade et simulation de la nouvelle couleur du bâtiment (IAPG Oldenburg). [12]

Figure 143a montre une image de mesure avec une superposition graphique d'un réseau de panneaux solaires planifié. Les paramètres de transformation du plan sont obtenus grâce à l'utilisation d'une croix de référence calibrée dont les points cibles peuvent être trouvés automatiquement dans l'image. La précision de la planification est d'environ 5 cm. Les modules solaires requis ont été insérés de manière interactive dans l'image à partir d'une banque de données et, avec projection de texture, ont donné une apparence réaliste. En utilisant une orientation extérieure approximativement calculée de l'image non calibrée, il est possible d'estimer les emplacements de points qui sont décalés perpendiculairement au plan du toit, par exemple pour visualiser l'aspect d'un module en relief Figure 143b.[12]

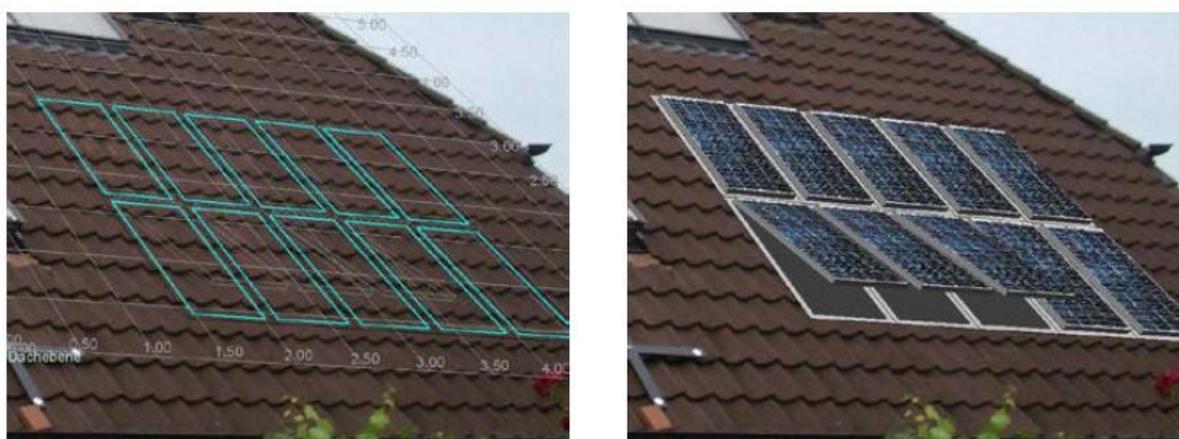


Figure 143 : Analyse d'image pour la planification de l'installation d'un panneau solaire sur un toit (IAPG Oldenburg). [12]

3.4. Diagnostic des ouvrages :

3.4.1. Exemple fissure d'un pont :

Matérielles utilisé : Canon EOS 5D II dispose d'un capteur optique CMOS et d'une résolution de 12,8 mégapixels avec un objectif à zoom fixe grand angle Canon EF 35mm f / 2 IS USM pour couvrir de grandes régions avec une bonne qualité.

Logicielle utilisé : Agisoft Photoscan Professional

Analyse d'une fissure :

Puisque ReCap est principalement un programme utilisé pour visualiser et mesurer des nuages de points, il est uniquement possible de faire une analyse visuelle des données. Cela se fait en comparant les nuages de points à la même section du même pont où une fissure visible a été repérée sur place. La fissure est visible au niveau du support du tablier du pont. Figure 145 [49]

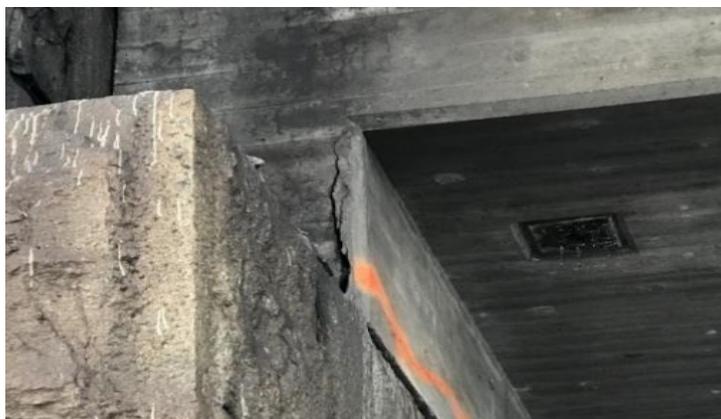


Figure 145 : fissure visible au support du tablier du pont. [49]



Figure 144 : Analyse des fissures. [49]

Dans Agisoft PhotoScan, on observe que le nuage de points à une densité plus élevée puisque deux points peuvent être plus proches l'un de l'autre que 1 mm Figure 146. [49]

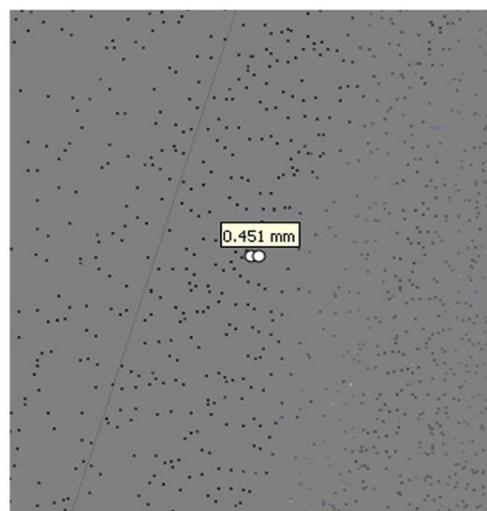
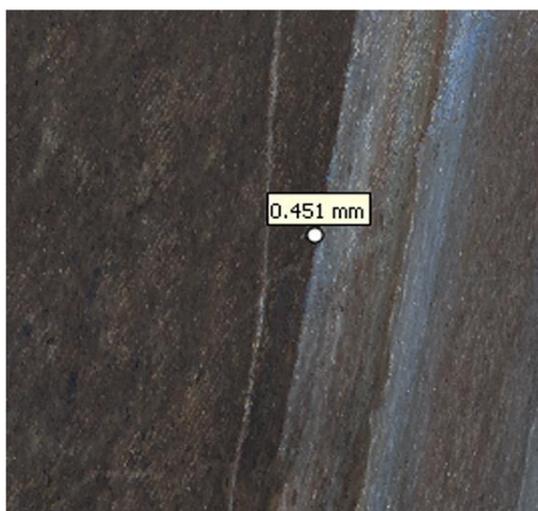


Figure 146 : De gauche Agisoft PhotoScan: Section d'un nuage de points. Droite: image agrandie du nuage de points. [49]

Déformation des réservoirs en béton :

Dans cet exemple, la déformation des cuves en béton utilisées pour la galvanisation et la galvanoplastie doit être mesurée dans des conditions de travail. Les réservoirs sont construits à partir d'un béton spécial et ont des dimensions d'environ 4 m x 1 m x 2 m. En fonctionnement, ils sont lentement remplis de liquide d'un poids total de 7,5 tonnes. Les parois du réservoir sont soumises à des déformations critiques qui doivent être observées photogrammétriquement à intervalles de 10 minutes. Environ 325 points doivent être mesurés avec une précision inférieure à 0,1 mm. [12]

En raison de l'environnement d'objets très confinés, la distance focale la plus courte disponible pour un appareil photo numérique Fuji FinePix S2 (f = 14 mm) doit être utilisée. La Figure 147

montre la configuration de mesure qui utilise deux longueurs de référence pour définir l'échelle. Cependant, les points du côté le plus petit de l'objet n'ont pas pu être observés avec des angles d'intersection optimaux, par conséquent, la précision du point de l'objet est plus faible dans ces zones. Les échelles d'image obtenues étaient comprises entre 1 :70 et 1 : 120. Les déformations calculées montrent un comportement systématique (Figure 148). [12]

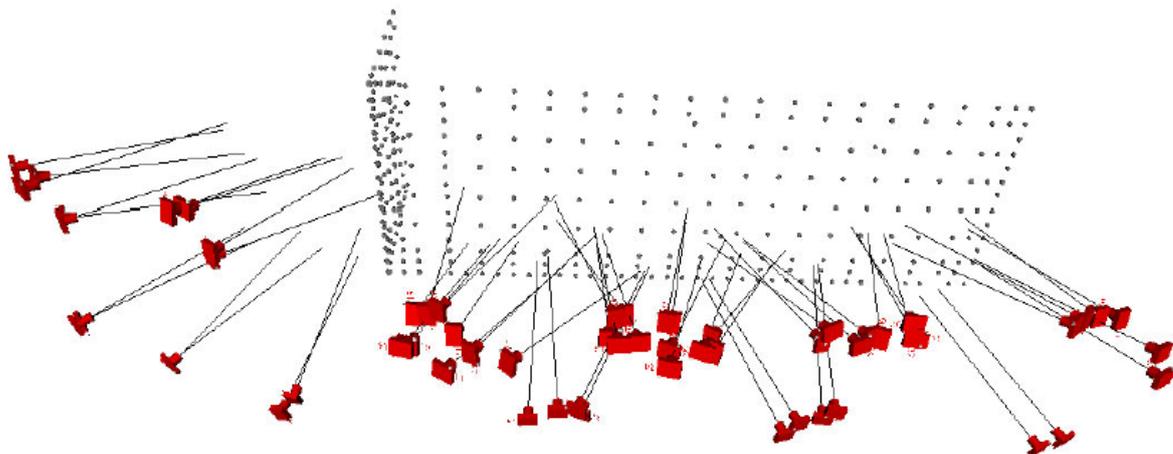


Figure 147 : Configuration d'imagerie (IAPG Oldenburg). [12]

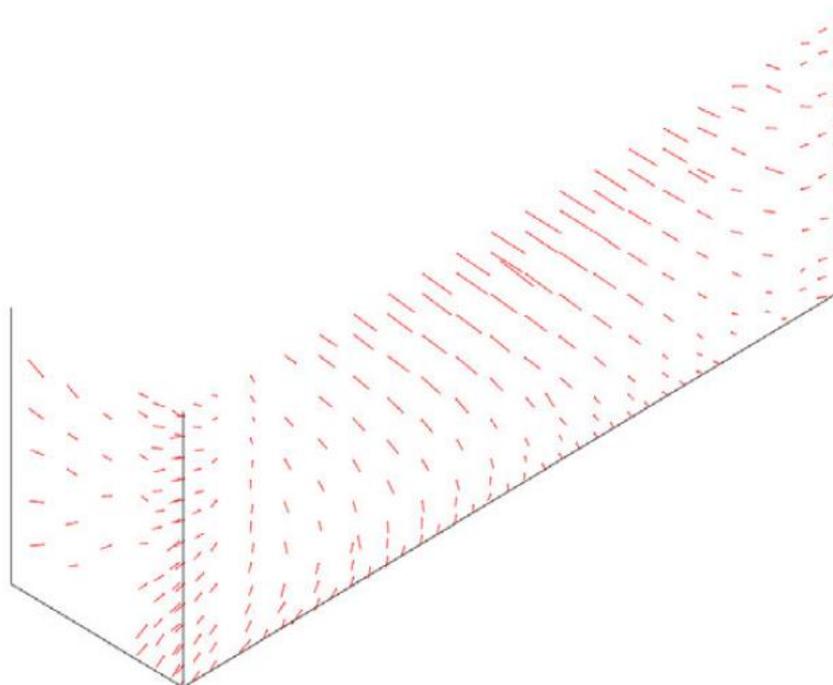


Figure 148 : Vecteurs de déformation résultants entre deux mesures séquentielles (IAPG Oldenburg). [12]

3.5. Calcule de cubature :

3.5.1. Exemple Calcul d'un volume de terre et de sa masse :



Figure 149 : Tas de terre traité. [50]

Il a consisté en le calcul du volume et de la masse d'un objet, en l'occurrence d'un tas de terre végétale. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un GPS et d'une station totale pour la partie topographique, et à avec les APN Nikon Coolpix S3500 et Sony NEX-7 pour la partie photogrammétrique. Des mesures à l'aide d'un scanner laser ont également été ajoutées à ces comparaisons. [50]

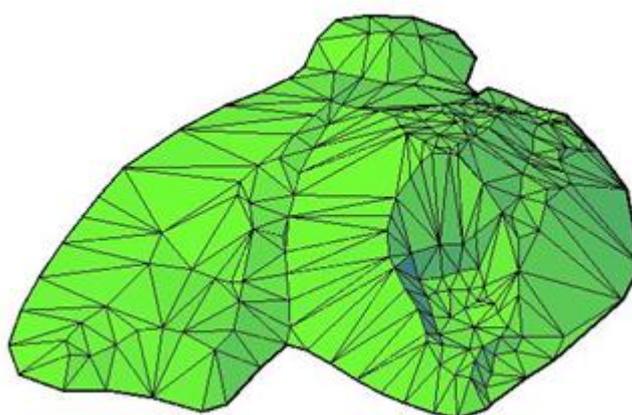


Figure 150 : Modèle numérique de terrain généré à l'aide du GPS (Source : personnelle). [50]

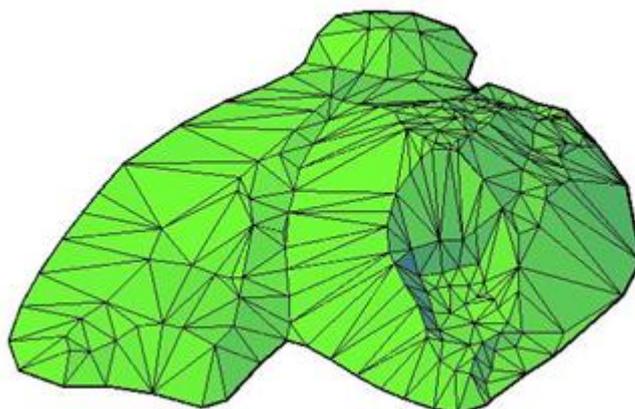


Figure 151 : Modèle numérique de terrain généré à l'aide de la station totale (Source : personnelle). [50]

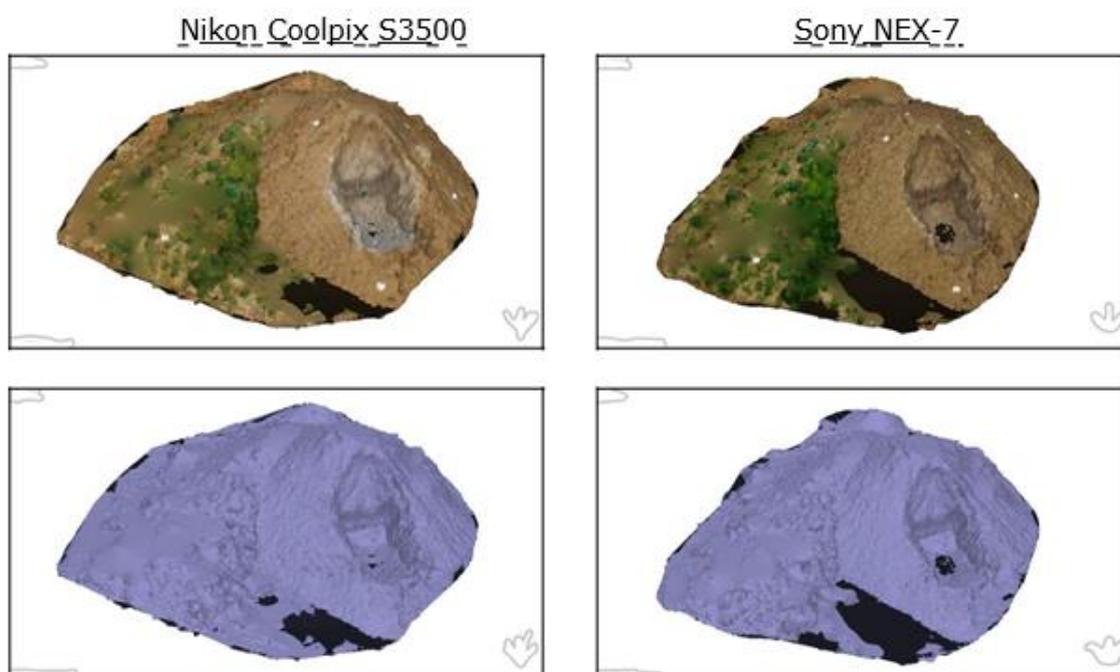


Figure 152 : De gauche à droite : Maillage fermé (coloré et monochrome) du Nikon Coolpix S3500, Du Sony NEX-7 (Source : personnelle). [50]

3.6. L'analyse des déformations des éléments :

3.6.1. Mesure de la déformation des éléments soudés :

Afin de mesurer les déformations locales et globales, les points de mesure sont marqués au niveau d'un élément soudé comme montré à la fois sur la Figure 153 et la Figure 154. U0 et L0 sont des points de mesure pour observer la déformation globale de l'élément de test. U1 ~ U10 et L1 ~ L10 sont des points de mesure pour observer la déformation locale à proximité d'un joint soudé en partie supérieure et inférieure.[51]

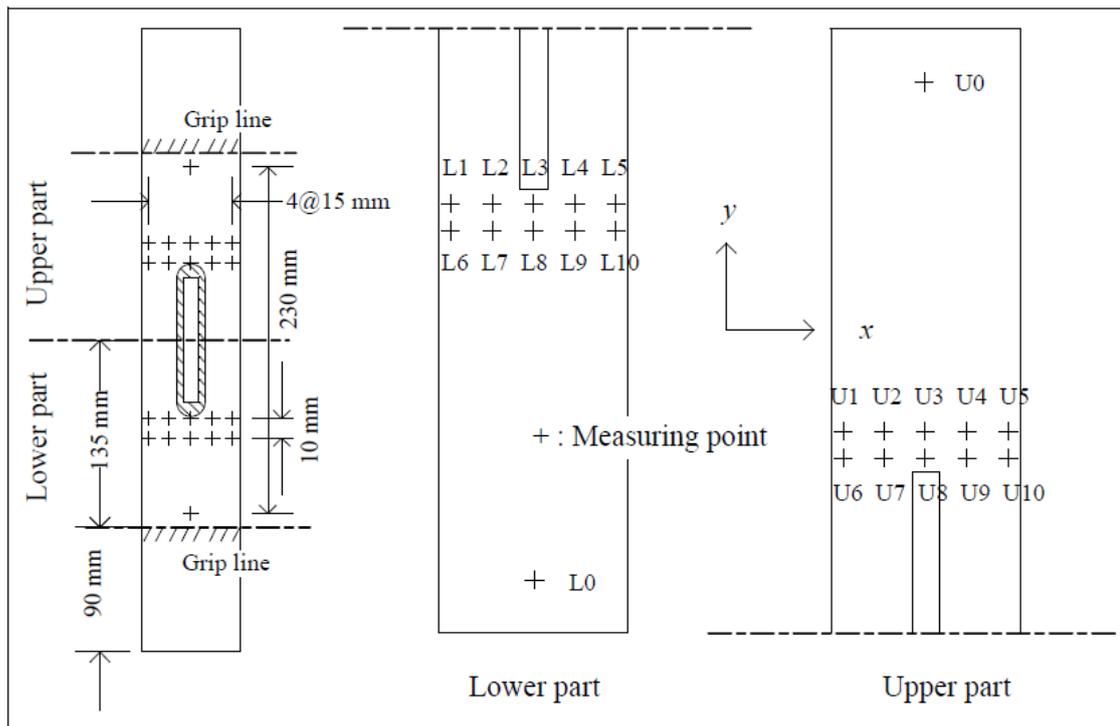


Figure 153 : Points de mesure marqués dans l'élément soudé. [51]

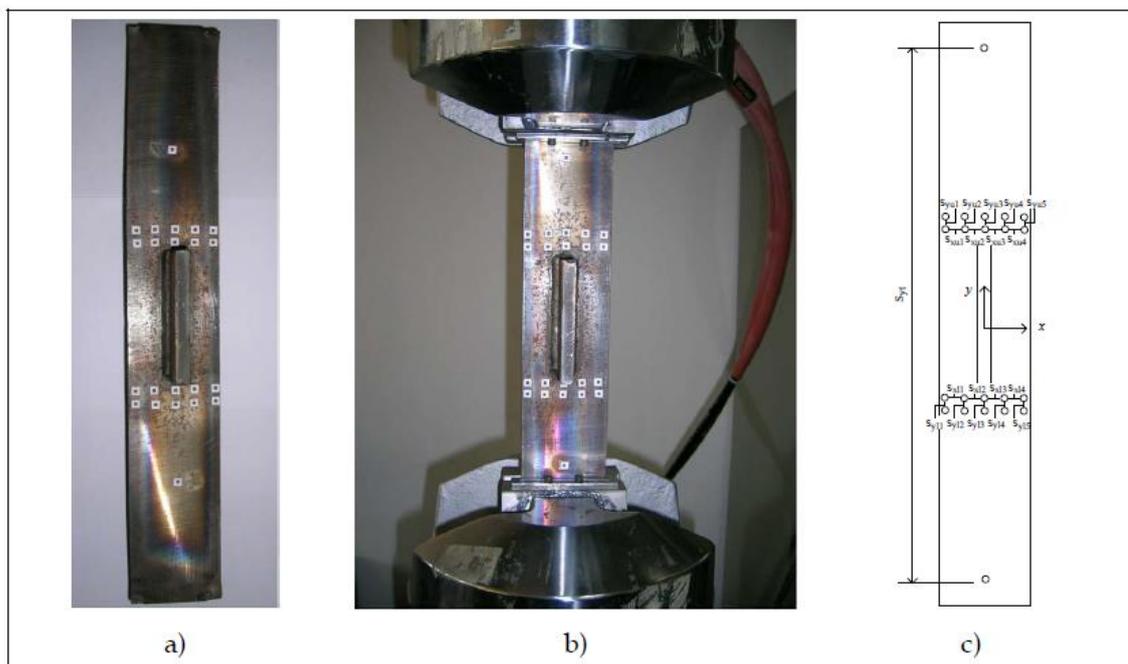


Figure 154 : Vue de l'élément soudé: a) points de mesure marqués de l'élément soudé, b) essai de traction grément, c) modèles de déformation. [51]

Pour vérifier l'exactitude et l'applicabilité du VMS (Visual Monitoring System) et étudier les caractéristiques du comportement de déformation dans un assemblage soudé, des valeurs de déformation sont calculées à chaque point de mesure. Les déformations à chaque point de mesure sont représentées sur la Figure 155. (Syt) est les valeurs de déformation globale du VMS d'un élément de test correspondant à celles mesurées par un instrument de test (MTS-810). Sxu1 ~ Sxu10 et Syu1 ~ Syu10 sont des valeurs de déformation à la partie supérieure dans

la direction x et la direction y. $S_{x1} \sim S_{x10}$ et $S_{y1} \sim S_{y10}$ sont des valeurs de déformation à la partie inférieure dans la direction x et la direction y. [51]

La déformation est mesurée par deux ensembles d'appareils photo numériques, situés à une distance de 2,1 m. VMS mesure la déformation des points de mesure toutes les 50 secondes. La Figure 154 montre un élément soudé marqué des points de mesure et un banc d'essai de traction (Han et al., 2008). [51]

Les résultats :

Pour confirmer l'exactitude et l'applicabilité du VMS, les valeurs de déformation (S_{yt}) du VMS sont comparées à celles d'un instrument de test (MTS-810) comme indiqué sur la Figure 155. Les valeurs de S_{yt} mesurées par VMS sont en bon accord avec une contrainte-déformation courbe mesurée par MTS aux régions élastique et plastique. Et on voit que le VMS développé peut mesurer avec précision une déformation globale d'un membre de test. Il est conclu que le VMS développé à la haute précision de 90% et l'applicabilité de la mesure de la déformation pour les éléments soudés. [51]

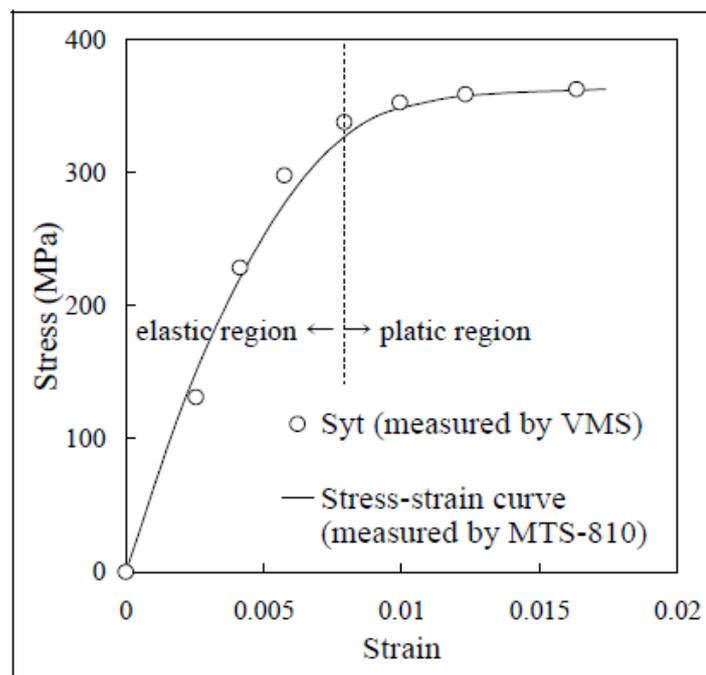


Figure 155 : Comparaison entre VMS et MTS-810. [51]

3.6.2. Application de VMS (Visual Monitoring System) à une structure réelle :

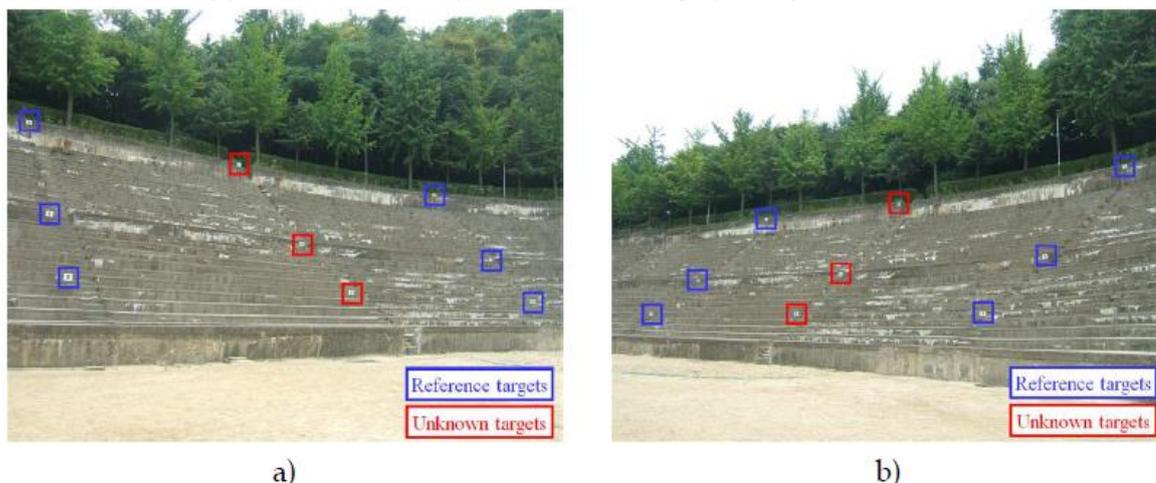


Figure 156 : Vue de la structure de simulation pour l'acquisition d'images en 3 dimensions: a) image de gauche, b) image de droite. [51]

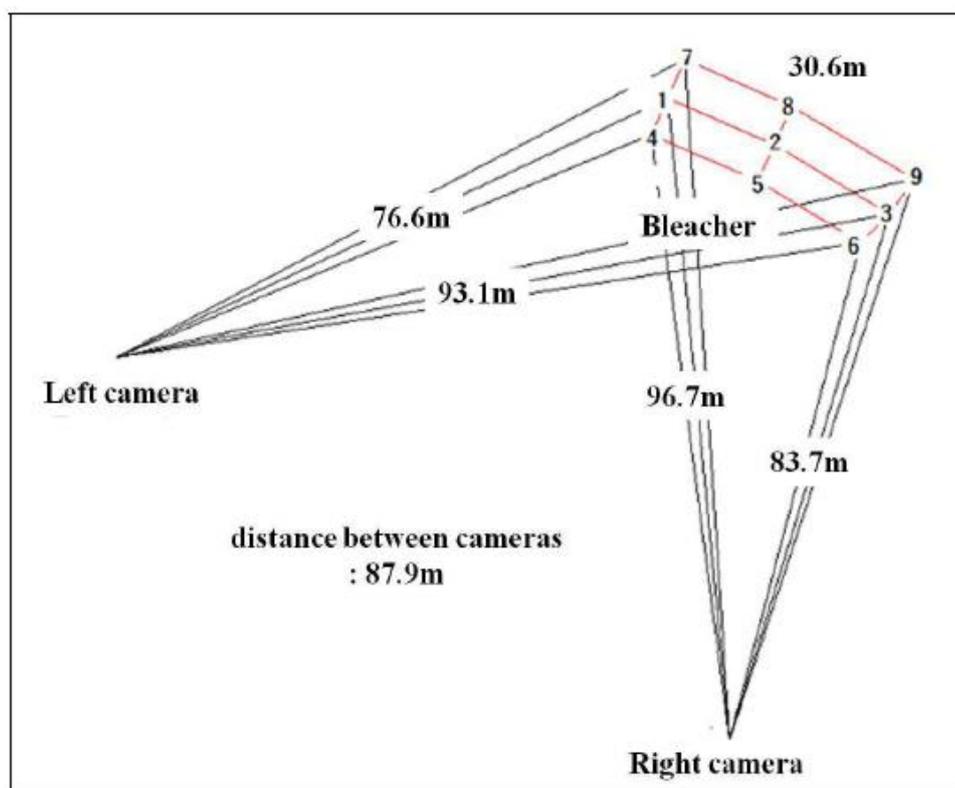


Figure 157 : Schéma de simulation. [51]

Les points cibles sont situés sur le gradin en béton à une distance d'environ 76 m à 97 m des caméras CCD et la distance entre les caméras est de 87,9 m comme le montre la Figure 157. Les points cibles de référence (numérotés comme 1, 3, 4, 6, 7 et 9) et les points cibles inconnus (numérotés 2, 5 et 8) sont situés sur la face du gradin en béton, respectivement (voir Figure 157 et Figure 157). La déformation des points cibles est mesurée par le système VMS. Comme il n'y avait pas de déplacement structurel réel pour la mesure, les points inconnus ont un mouvement simulé à partir de la position initiale par le déplacement forcé comme indiqué sur la Figure 158. Le déplacement forcé des points cibles suppose 5 cm en haut et en bas et 9 cm à

gauche et à droite. Par conséquent, chaque point inconnu est mesuré en quatre étapes au total. La procédure de simulation est suivie comme suit [51]:

1. Installez les caméras CCD et préparez le système VMS (voir Figure 159)
2. Fixez le point de référence et le point inconnu cible les points sur l'objet, puis
3. Obtenir les coordonnées tridimensionnelles initiales de l'image en utilisant à la fois le VMS et la station totale
4. Obtenir les coordonnées tridimensionnelles des caméras en utilisant la station totale
5. Obtenir les coordonnées des images de gauche et de droite par déplacement forcé
6. Répétez (5) le processus en fonction de chaque étape

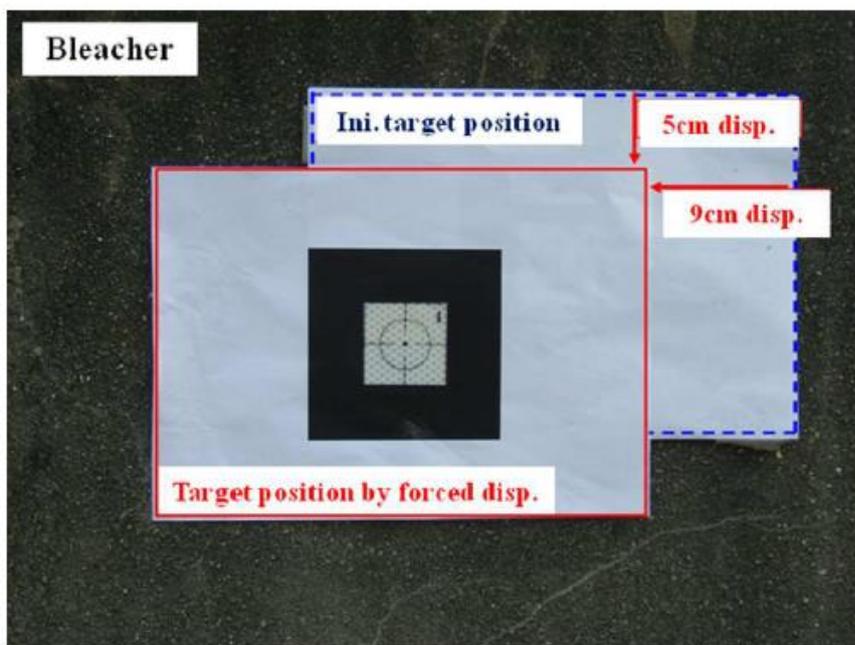


Figure 158 : Déplacement forcé de la cible. [51]



Figure 159 : Vue des caméras CCD et du système informatique avec VMS. [51]

Les résultats :

Les résultats de mesure basés sur le déplacement initial et forcé sont analysés comme indiqué dans le Tableau 7 et le Tableau 8. Les coordonnées initiales de l'image utilisant à la fois la station totale et le VMS sont presque identiques comme indiqué dans le Tableau 7. Les déplacements initiaux de la station totale et du VMS sont nuls. De plus, le déplacement en fonction du déplacement forcé est mesuré à la fois par la station totale et le VMS. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8. La comparaison des résultats de mesure montre que la

différence est de 0,325 mm à 10,436 mm de manière irrégulière. Cependant, la précision du VMS est acceptable car la plage de différence calculée en fonction du pixel de la caméra et de la distance de mesure a un maximum de 10,436 mm. [51]

Cela signifie que le VMS peut s'appliquer pour mesurer le déplacement, la déformation et la fissuration des structures de génie civil. De plus, la précision du VMS sera améliorée en permanence car le taux d'erreur dans la capacité des caméras sera diminué par le développement industriel lié aux appareils d'acquisition d'images. [51]

Targets number	Test step	Total station value			VMS value			Point classification
		x	y	z	x'	y'	z'	
1	Initial	37491	104055	-170330	37491	104055	-170330	reference
2		50732	104053	-173430	50797	104052	-173335	Unknown
3		66774	104083	-173912	66774	104083	-173912	reference
4		38404	101559	-166586	38404	101559	-166586	reference
5		51345	101437	-169566	51398	101445	-169534	Unknown
6		66096	101606	-169967	66096	101606	-169967	reference
7		36781	107416	-173733	36781	107416	-173733	reference
8		49892	107274	-176846	49971	107247	-176695	Unknown
9		66988	107393	-177548	66988	107393	-177548	reference

Tableau 7 : Coordonnées initiales des cibles. [51]

Test step	Unknown point	Total station value			VMS value			Total station disp. (mm)	VMS disp. (mm)	Disp. subtraction (mm)
		x	y	z	x'	y'	z'			
Step 1	5	51434	101386	-169592	51486	101401	-169558	101.272	106.049	-4.777
Step 2		51431	101483	-169592	51480	101498	-169554	99.664	101.073	-1.409
Step 3		51255	101483	-169545	51310	101497	-169511	104.771	102.619	2.153
Step 4		51253	101392	-169548	51309	101398	-169518	101.912	104.530	-2.619
Step 1	2	50814	104014	-173452	50888	104008	-173358	103.663	93.227	10.436
Step 2		50816	104104	-173448	50883	104100	-173352	99.945	99.620	0.325
Step 3		50641	104104	-173408	50708	104098	-173310	103.257	106.287	-3.030
Step 4		50636	104017	-173415	50705	104008	-173311	104.766	103.350	1.416
Step 1	8	49979	107232	-176874	50060	107202	-176724	103.860	100.538	3.322
Step 2		49978	107321	-176871	50050	107293	-176719	94.515	101.020	-6.505
Step 3		49796	107323	-176833	49882	107290	-176679	100.130	108.735	-8.605
Step 4		49799	107228	-176839	49884	107195	-176682	102.186	104.239	-2.052

Tableau 8 : Résultats de comparaison entre la valeur totale de la station et la valeur VMS en fonction du déplacement forcé. [51]

3.7. Géo-conception (photoréalisme) :

3.7.1. Modélisation de campus 3D virtuel à l'aide de la photogrammétrie à courte portée :

La méthodologie : [52]

- Créer une description de caméra calibrée ou approximative,
- Planifier le projet de mesure,
- Prenez des photos de l'objet ou de la scène,
- Importez les photos
- Marquer des éléments (par exemple des points, des formes, etc.) sur les photos,

- Identifiez les points identiques,
- Traiter les données, et
- Exportez les données 3D résultantes vers un programme CAO ou graphique.

L'organigramme de la méthodologie peut être présenté comme suit :

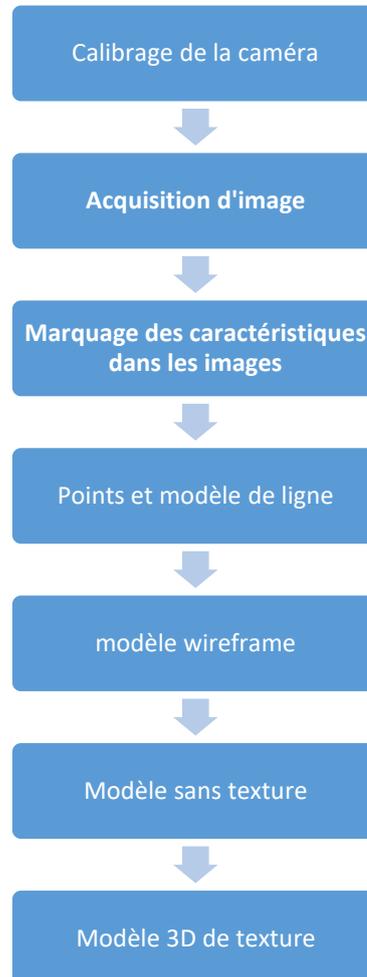


Figure 160 : The flow diagram of the methodology

Le matériel utilisé :



Figure 161 : Caméra Sony DSC HX7V utilisée pour l'acquisition d'images

Traitement des images :

Logicielle utilisé : Photomodeler 6

Après avoir chargé les images, nous marquons les points similaires dans les images correspondantes. Basé sur les principes de la stéréophotogrammétrie, il calculera et créera un point 3D dans l'espace. [52]

Il calculera également les positions des caméras pour les projets. Toutes les positions de la caméra sont visibles sur la Figure 162. [52]

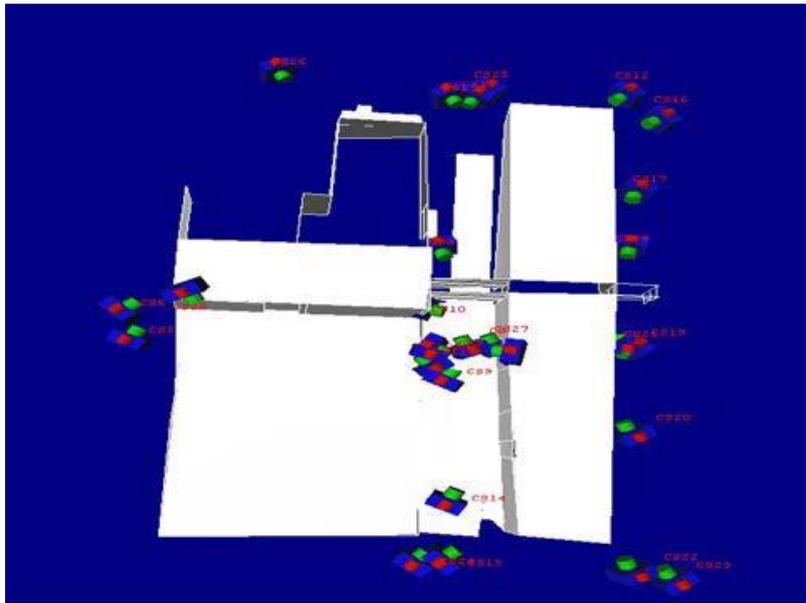


Figure 162 : Positions de la caméra pendant l'acquisition de données. [52]

Le résultat :

Par cette étude photogrammétrique à courte portée basée sur l'image, nous avons obtenu un modèle 3D virtuel photoréaliste du Département de génie civil, Institut indien de technologie, Roorkee, (IIT-R), Inde, Figure 163 est obtenue. [52]



Figure 163 : Modèle texturé photo-réaliste 3D virtuel du Département de génie civil, IIT-Roorkee. [52]

Ce modèle 3D est mesurable et possède une très bonne précision. [52]

Conclusion :

Cette technique photogrammétrique basée sur l'image est très utile pour créer une modélisation virtuelle 3D de la ville, car dans certaines régions, les images aériennes et les images satellite ne sont pas facilement disponibles, mais les images de la caméra sont facilement disponibles. Le coût et la précision sont également très bons. En utilisant cette méthode, n'importe qui peut créer un modèle 3D virtuel pour diverses applications. De cette façon, nous pouvons conclure : « La photogrammétrie à courte portée est un bon outil à faible coût pour créer un modèle photoréaliste 3D d'un bâtiment ». La précision du modèle est dans la limite acceptable. L'erreur est possible en raison d'un marquage incorrect sur les photos. Nous pouvons également discuter de certains avantages et limites de cette méthode. Voici les principaux avantages et limites de cette méthode.[52]

3.8. Levé topographique par photogrammétrie :

Le type de photogrammétrie le plus utilisé pour le levé topographique c'est la photogrammétrie aérienne (par drone, avion ...ect), les levés deviennent de plus en plus nécessaires et précis ; L'acquisition s'effectue par procédé de photogrammétrie. La photogrammétrie aérienne (relevé topographique par drone) permet la réalisation d'un modèle 3D géoréférencé à partir de fichiers photographiques capturés.[53]

La photogrammétrie par drone est une technique consistant à déterminer les dimensions et volumes d'objets ou d'espaces à partir de photographies aériennes. Elle se réalise en traitant numériquement une succession d'images prises de différents points de vue afin d'obtenir une projection en relief. L'utilisation du drone permet de produire un grand volume de donnée 3D géoréférencées en peu de temps avec des possibilités de prises de vue complexes.[53]

Elle est une technique de modélisation extrêmement puissante avec laquelle une grande précision peut être atteinte si des protocoles de relevé et de traitement rigoureux sont appliqués. Cette technique innovatrice repose sur 3 phases primordiales :[53]

- Le géoréférencement de cible photogrammétriques sur la zone d'intérêt,[53]
- La captation de clichés photogrammétrie,[53]
- Le traitement photogrammétriques[53]



Figure 164 : levé topographique aérien par la technique de photogrammétrie [54]

3.9. Suivi des chantiers :

3.9.1. Génération d'un modèle 3D basé sur la photogrammétrie oblique d'UAV (Unmanned Aerial Vehicle) à basse altitude :

Le chantier de construction est situé dans la ville de Gutang dans le district de Jiading, Shanghai, Chine. Ce site est un programme de développement des énergies renouvelables qui reçoit une attention considérable de la part du gouvernement de Shanghai. C'est donc un projet clé de Shanghai et le projet numéro un du district de Jiading. La taille du projet de construction est de 46475 m². [55]

Système de photogrammétrie oblique de UAV :

Le drone multi-rotor (Figure 165a) que nous avons utilisé dans cette recherche est conçu pour le vol aérien à une altitude de 100 à 300 mètres. L'UAV est équipé d'une caméra à 5 objectifs avec un nadir et 4 vues obliques qui est capable de capturer des images sous cinq angles différents (Figure 165b). Les angles de vue des quatre lentilles obliques sont de 45 degrés. Des instruments GPS et IMU sont également montés pour acquérir les informations de localisation géographique et d'attitude au moment de l'exposition. [55]

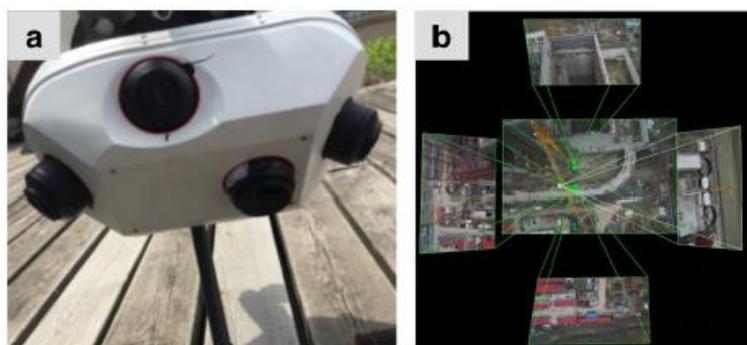


Figure 165 : a) L'UAV multi-rotor équipé d'une caméra à 5 lentilles. b) Un ensemble d'images d'exposition à un moment donné. [55]

Planification d'itinéraire de vol :

L'altitude de vol était de 100 mètres. La résolution au sol des images acquises est de 2 mm / pixel avec un chevauchement de parcours de 70% et un recouvrement latéral de 50%. La Figure 166a illustre notre planification d'itinéraire de vol et la Figure 166b montre l'image ortho-mosaïque de l'ensemble de la zone d'étude. Les images acquises sous plusieurs angles évitent le problème de bloc de prise de vue qui se produit lors de la photographie aérienne traditionnelle. Les textures des différentes façades sont également parfaitement rassemblées pendant le vol. [55]

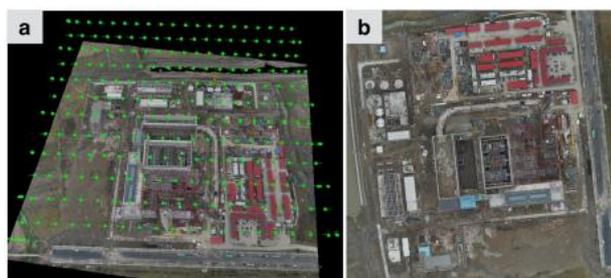


Figure 166 : a) Planification de l'itinéraire de vol de la zone d'étude. b) L'image ortho mosaïque de la zone d'étude. [55]

Post-traitement de la photogrammétrie des UAV et production de modèles 3D :

Le post-traitement a utilisé Pix4D Mapper (Vallet et al. 2011) pour compléter le levé de photogrammétrie oblique. Au total, 2560 images ortho et obliques ainsi que des données POS ont été entrées dans le système pour effectuer la rectification d'image. Une différence relative entre les paramètres de caméra internes initiaux et optimisés de 2,63% a été acquise au cours du processus d'optimisation de la caméra. L'ajustement du faisceau de l'orientation intérieure et extérieure a été effectué avec l'erreur de re-projection moyenne de seulement 0,2 pixel. Avec l'utilisation de la technologie de correspondance d'images dense, un modèle de maillage triangulaire (Figure 167a) a été acquis sur la base d'un nuage de points dense d'images réelles. Le rendu de texture a été réalisé sur le modèle de maillage triangulaire, et un modèle d'architecture 3D (Figure 167b) a finalement été réalisé. [55]

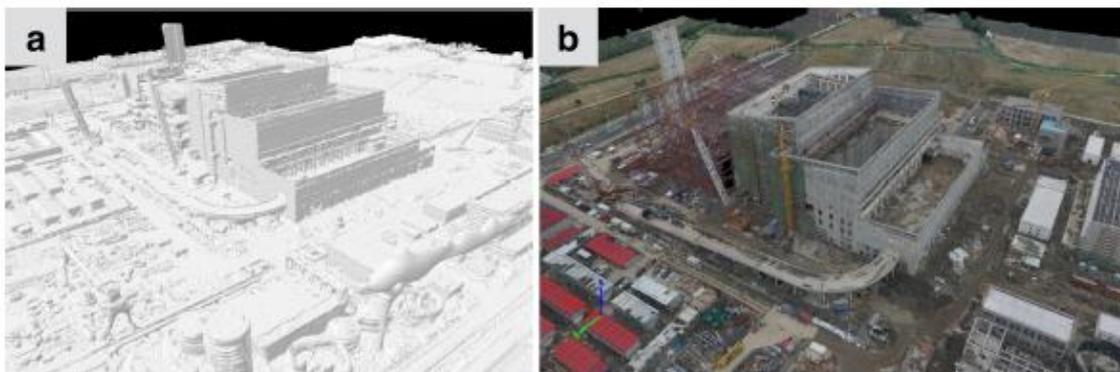


Figure 167 : a) Le modèle de maillage triangulaire construit pour la zone d'étude. b) Le modèle d'architecture tridimensionnelle basé sur la réalité de la zone d'étude. [55]

Chapitre 05 :

Applications

Dans ce chapitre nous allons décrire la démarche pour la reconstitution photogrammétrique que nous avons suivi soit pour la prise de vue ou dans le traitement d'image sous le logiciel choisi. Nous citerons aussi dans ce chapitre nos premiers essais dont les résultats n'été pas satisfaisantes, et ceci pour discuter les défaillances et les erreurs commises pour ressortir l'importance de quelques aspects techniques lors de prise de vue.

1. Appareil utilisé :

Comme décrit dans le chapitre antécédant, il existe une gamme très variée d'appareil photographique, dont les caractéristiques auront une influence sur les résultats du nombre de prise de vue et la qualité finale de reconstitution.

Nous avons utilisé une caméra de téléphone mobile de marque Samsung j7 Pro dont les caractéristiques sont décrites en annexe. Ceci dit qu'on a choisi la petite taille du « Frame » par rapport aux appareils professionnels et par conséquent le mauvais choix !

Cependant, les essais de reconstitution tridimensionnelles avec les téléphones portables et les applications logiciel (sur Play store) y lié sont en émergence d'utilisation, vue les avantages de moindres couts qu'ils présentent. Mais ces applications visent le public profane ou amateur. En effet, les objet reconstruit sont trop petit et ne doivent pas dépasser les dizaines de centimètre afin d'alléger le traitement d'image qui est effectué en temps réel sur le téléphone portable.

Par ailleurs, notre but n'est pas d'utiliser ce genre d'application, mais utiliser la caméra du téléphone portable pour l'acquisition des photos seulement. Le post-traitement sera par le biais du logiciel décrit ci-après.

2. Logiciel utilisé

Nous avons opté pour le logiciel « Photomodeler » version 2017, c'est un logiciel commercial spécialisé dans le traitement des photos à usages photogrammétrique

Photomodeler présente une richesse fonctionnelle remarquable, le logiciel est développé par la compagnie américaine « Eos System » depuis 1994.

L'interface du logiciel présente une gamme de différents traitements au choix dès son démarrage ; à savoir l'élaboration des points cibles, la calibration de la caméra, modélisation manuel...etc. Par ailleurs, le logiciel ne nous fournit pas un assistant global pour un nouvel utilisateur, malgré l'existence des assistant dans chaque opération choisie, nous jugeons que les concepts de base de la photogrammétrique sont nécessaires et une formation spécifique sur le logiciel est obligatoire pour la bonne manipulation de ce type de logiciel professionnel.

En ce qui concerne les ressources matérielles minimale prérequis pour une utilisation de photomodeler ou même un logiciel photogrammétrique similaire il est préférable d'avoir les caractéristiques suivantes :

System exploitation : OS : Windows 10/8.1/8 64 bits ;
Processor : Dual Core 2.0GHz ;

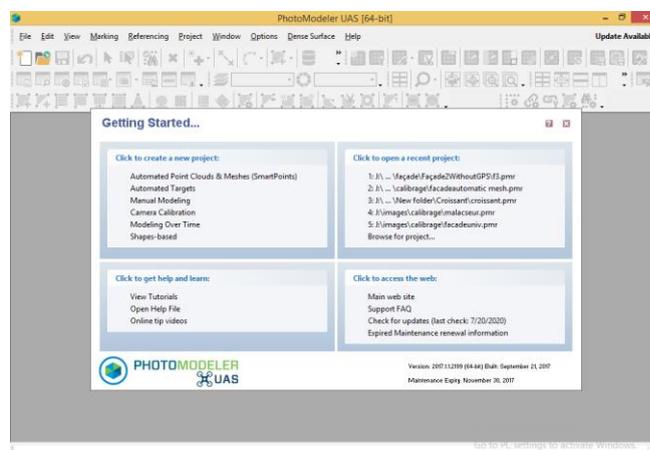


Figure 168 : fenêtre de démarrage pour logiciel «Photomodeler» version 2017

Mémoire : 16GB System RAM ;
 Espace disque dur : 10GB free HDD Space ;
 Vidéo Carte : Direct X 9.0c compliant video card with 256 MB of RAM ;

Pour notre cas nous avons les caractéristiques suivantes

Système d'exploitation : Windows 8 64 bits

Processeur : intel core i3 1.8Ghz

Mémoire : RAM 8 Go

Intel graphique 4000 1.7Go DirectX 11

En comparant les deux caractéristiques, nous pouvons dire qu'on utilise des ressources moins que le minimum prérequis, le temps de traitement sera en conséquence assez long.

3. Nos premiers essais

Les premiers essais qu'on a effectué au niveau du laboratoire de génie civil de l'université été focaliser sur le calibrage de la caméra du téléphone portable en premier lieux, puis sur l'avantage d'activation de la position GPS au moment de prise de vue, c'est-à-dire avoir des images géoréférencées dans le système mondiale WGS84 (World Géodésie System).

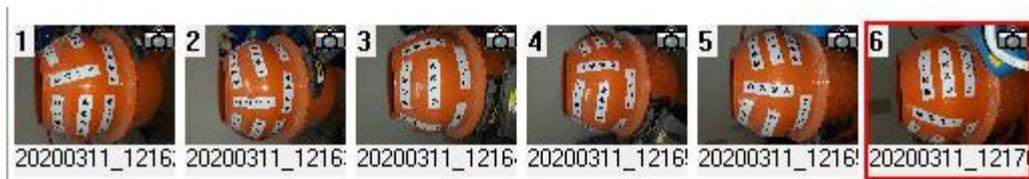


Figure 169 : le calibrage de la caméra à partir des cibles fixer sur le malaxeur

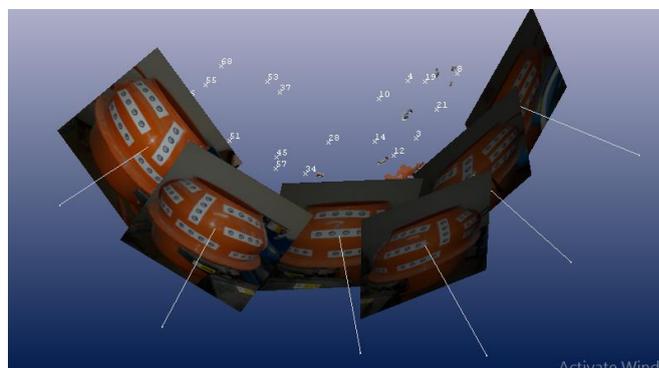


Figure 170 : traitement des images sur logiciel photomodeler

La reconstitution n'est pas faite par le logiciel malgré le logiciel a pu détecter certain point en commun entre les 06 photos prise autour de l'objet (Malaxeur) partiellement. Ceci est due essentiellement au recouvrement

minimal entre les photos qui n'été pas respecté, En effet, selon le rapport de photomodeler aucun recouvrement n'a atteint les 60%.

Ceci induit que le critère du recouvrement est préliminaire par rapport aux autres. Le logiciel comme indique la figure antécédente (Figure 170)a pu ressortir les orientations externes de la caméra ainsi que les positions exactes de prise de vue, avec l'option GPS désactivé.

Le deuxième essai comme indique la figure ci-après concerne un objet plus grand ; la façade est photographiée par 03 prise de vue aligné, les deux premiers respectent un recouvrement de plus de 90% mais le dernier été moins de 26%. Les photos sont géoréférencées c'est-à-dire que le GPS été activé.

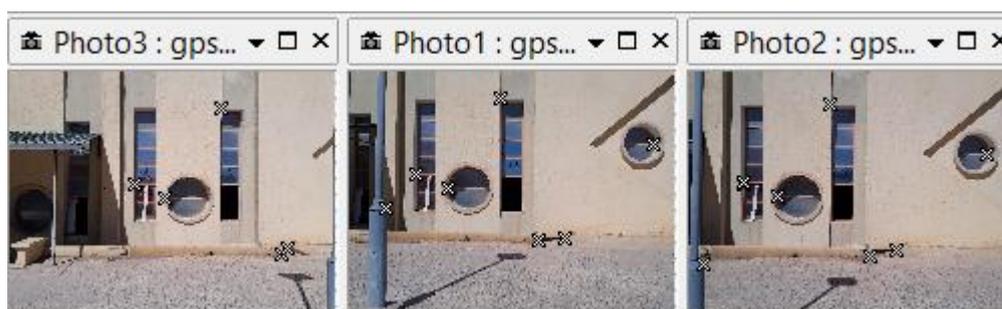


Figure 171 : photos pour la façade du laboratoire du génie civil

La reconstitution est calculée dans la zone commune ; et les résultats sont comme le montre le tableau ci-dessous

Photo coverage (percent)		
Minimum: 26.7	Maximum: 55.7	Average: 39.7

Tableau 9 : résultats de la reconstitution des photos

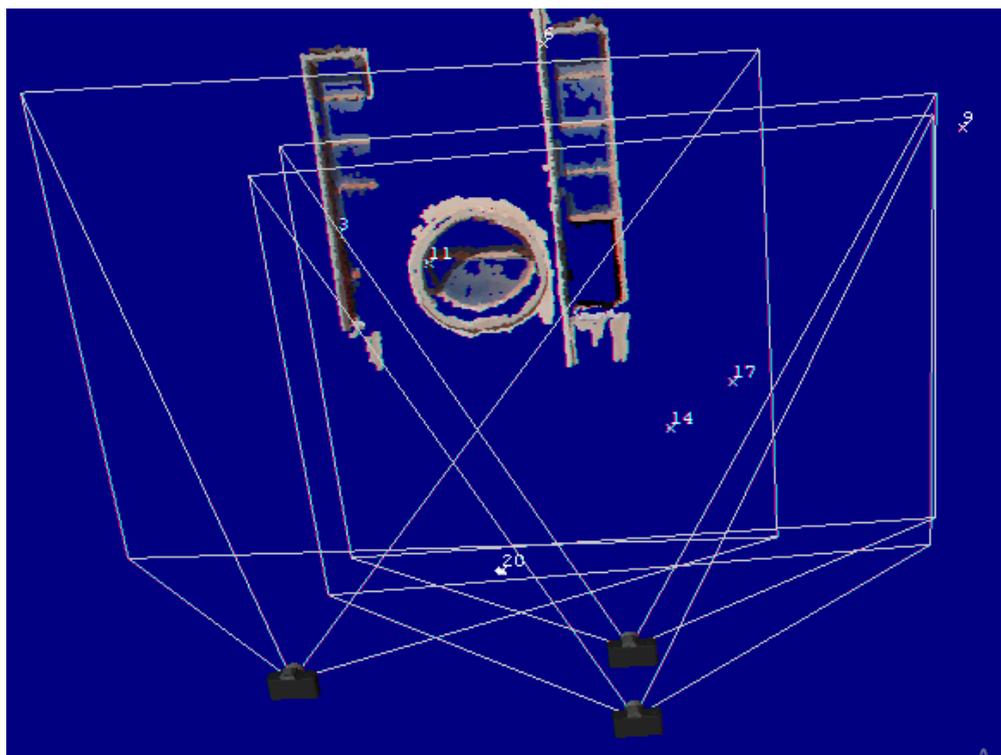


Figure 172 : le maillage de la façade du laboratoire suivant le recouvrement obtenu

On remarque que le maillage ne couvre pas toute la surface commune, ceci est dû au manque de données pour le calcul des surfaces n'ont couvert. Malgré que ces surfaces se trouve dans la zone de couverture, elles présentent deux inconvénients majeurs, il s'agit de l'angle de prise de vue.

En effet l'objet est reconstitué par les deux photos de 80% de recouvrement la troisième est systématiquement éliminée dans le traitement ; mais ; selon la figure ci-dessus les positions de camera sont longitudinale avec presque le même angle de prises de vue (Ω , κ , ϕ). Ce qui signifie que l'objet n'est pas pris correctement de deux angles différents pour une meilleure reconstitution.

Si on oblige le logiciel à relier les points de calage détecté automatiquement (Figure 171) sans prendre en considération les grand éloignement (pour couvrir les vide dans l'image précédente) le résultat est comme suit (Figure 173) :



Figure 173 : les résultats de liaison des points de calage détecter automatiquement

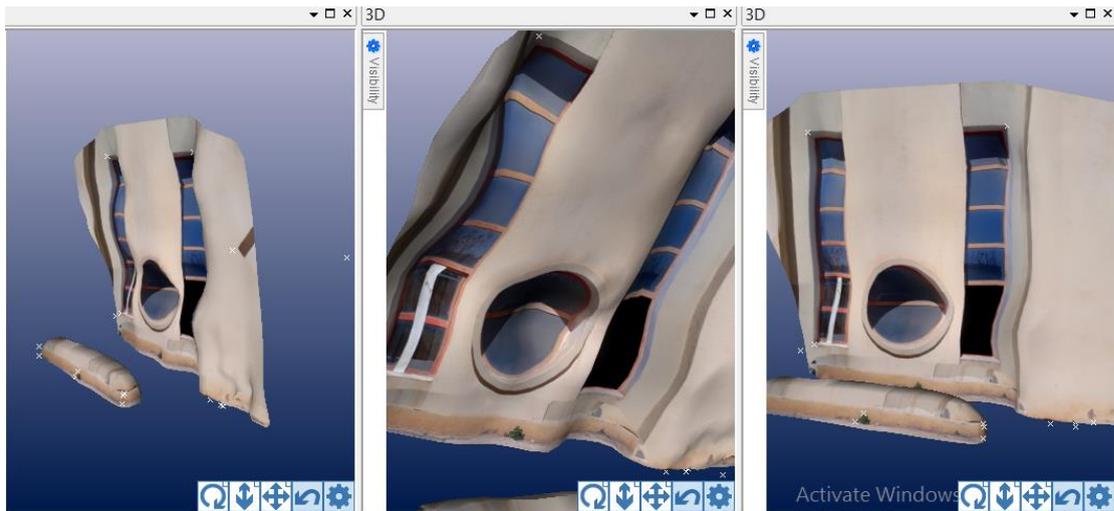


Figure 174 : résultat de traitement après la liaison automatique de points de calages

La déformation est assez claire ; ce qui renforce l'importance de la technique de prise de vue utilisé pour chaque cas figure. Ce type d'utilisation pratique est peu abordé dans la bibliographie actuelle. Elle se trouve généralement sur des séquences vidéo sur internet comme YouTube de certains photogrammètres à titre de conseils et guide en grosso-modo.

Nous allons par suite décrire notre démarche pratique et de traitement informatique pour les cas que nous avons jugé réussi.

4. Les Essais réussis

Nous avons jugé utile de choisir deux scènes d'architecture différente, à savoir le monument de forme croissant situé à l'entrée de l'université et une partie de façade extérieure du laboratoire de Génie civil.

En ce qui concerne le monument « croissant » la méthode adaptée est celle de la prise de vue circulaire ; nous allons effectuer 27 photos à équidistance par rapport au centre du monument et angle constant entre chaque prise de vue et autre soit entre 10° et 15° , ceci est établi par estimation visuelle et pas constant respectivement.

Notons que plus de nombre de prise vue augmente plus nous assurons les critères décrit précédemment, mais il est préférable d'avoir un nombre optimal afin de réduire le temps de traitement.



Figure 175 : prise de vue pour le monument << croissant >>

L'un des défis dans ce cas est l'élimination de l'arrière-plan :

En effet, les arbres forment un obstacle majeur vu leur structure complexe et leurs existences dans tous les photos prises autour du croissant, l'extraction de l'objet souhaité devient plus difficile s'il contient des couleurs proches de l'arrière-plan, ce qui n'est pas le cas pour notre croissant à première vue ; mais avec une vision plus fine, on remarque que la couleur verte se trouve sur le croissant et plus précisément sur les drapeaux comme le montre la figure ci-dessous. En plus, la maquette du globe est pleine de pixels de différentes couleurs proches de l'arrière-plan.



Figure 176 : les problèmes trouver durant la prise de vue

Ce problème peut être résolu par la délimitation manuelle ou la vectorisation comme nous le décrivons ci-après.

La deuxième anomalie est plus complexe, celle des drapeaux. Ces derniers flottaient pendant les prises de vue, ce qui signifie qu'ils cachaient ou font apparaître des surfaces de l'objet cibles aléatoirement. Et par conséquent, il devient quasiment impossible de reconstituer certaines zones, les pixels des drapeaux seront mergés avec celle du croissant, malgré la solution de délimitation comme il est clair dans la Figure 178

5. Méthodologie de traitement

1- Calibrage de la caméra :

Comme décrit dans le chapitre 1, l'opération de calibrage est indispensable pour les opérations photogrammétrique, nous avons calibré notre camera de téléphone portable par rapport à un canevas de 100 point répartie sur une feuille A4, dont 4 points représentent des points marque de différente forme. Voir figure ci-dessous.

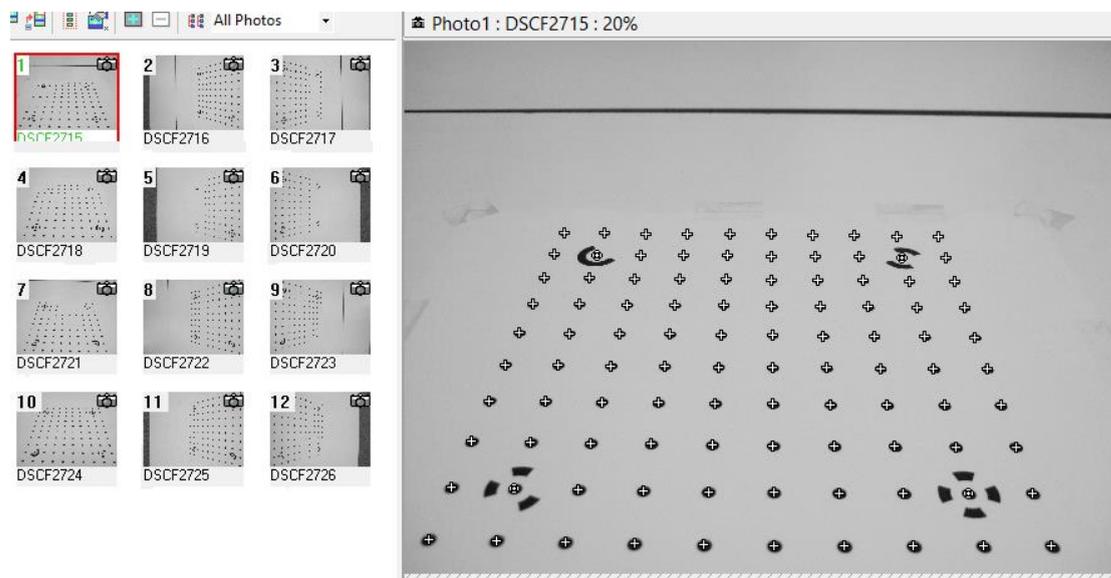


Figure 177 : différente type de point de marque

Le canevas doit être photographié sur les 4 coté avec 03 orientations de camera différente pour chaque côté, soit, Position normale, paysage gauche et paysage droit.

Cette opération nous a permis de ressortir les paramètres internes de notre camera comme indiqué ci-dessous :

- camera cameraMaker="samsung" cameraModel="SM-J730G"
- lense="3.7mm"
- ccdwidth="0"
- w="4128"
- h="3096"
- fx="3503.32861425"
- fy="3503.32861425"
- cx="2125.33005602"
- cy="1534.9647091"
- k1="0.20277770646"
- k2="-1.03779377554"
- p1="0"
- p2="0"
- k3="1.48925551918"
- skew="0"
- name="SAMSUNG SM-J730G (3.7mm) "

2- La délimitation de l'objet :

Les arrières plans représentent un obstacle majeur dans la phase de traitement de reconstitution. En effet comment le logiciel peut-il savoir ou extraire l'objet à reconstruire ?

Pour répondre à cette question est faut comprendre l'algorithme utilisé dans ce type de traitement d'image. On recherche la correspondance de chaque pixel de l'image N'a son homologue dans l'image N+1 puis chaque pixel de l'image N+1 à son homologue de l'image N+2. Ce type de traitement est appelé par image pair

On peut aussi rechercher tous les homologues du pixel de l'image N dans tous les images restantes. Rappelons que le pixel est défini par sa position dans l'image et une valeur qui correspond à sa couleur. Mais ceci ne suffit pas pour faire la correspondance ; il faut introduire d'autres algorithme basant que la théorie des ensembles pour traiter le pixel avec son enivrement (les pixels qui l'entourent).

Afin d'accélérer le process de cette opération qui peut durer quelques heures pour un simple projet, Photomodeler offre la possibilité d'une délimitation de l'objet via des outils de vectorisation.

La vectorisation doit être établie dans tous les prise de vue, mais elle sera de plus en plus rapide avec l'outil semi-automatique qu'offre photomodeler.



Figure 178 : la délimitation de l'objet

3- Le référencement :

Le référencement est le processus consistant à dire à PhotoModeler que les marques sur deux ou plusieurs photographies différentes représentent le même objet physique dans l'espace.

Les marques de photographie (positions identifiées par l'utilisateur sur les photographies) comme les coins ; les limites, sommet d'objet...etc, doivent être marquées et référencées dans chaque photographie sur laquelle l'objet apparaît.

Les marques doivent être référencées sur au moins deux photographies, mais peuvent être référencées sur autant de photographies qu'il y a dans le projet.

Dans la figure ci-dessous, nous faisons correspondre le point N069 à son homologue sur la photo de gauche. Photomodeler présente une ligne discontinue comme aide visuelle pour la correspondance des points.

Mieux encore, on peut avoir l'erreur de pointage en chaque position choisie. Cette erreur doit être inférieure à 2 pixels.

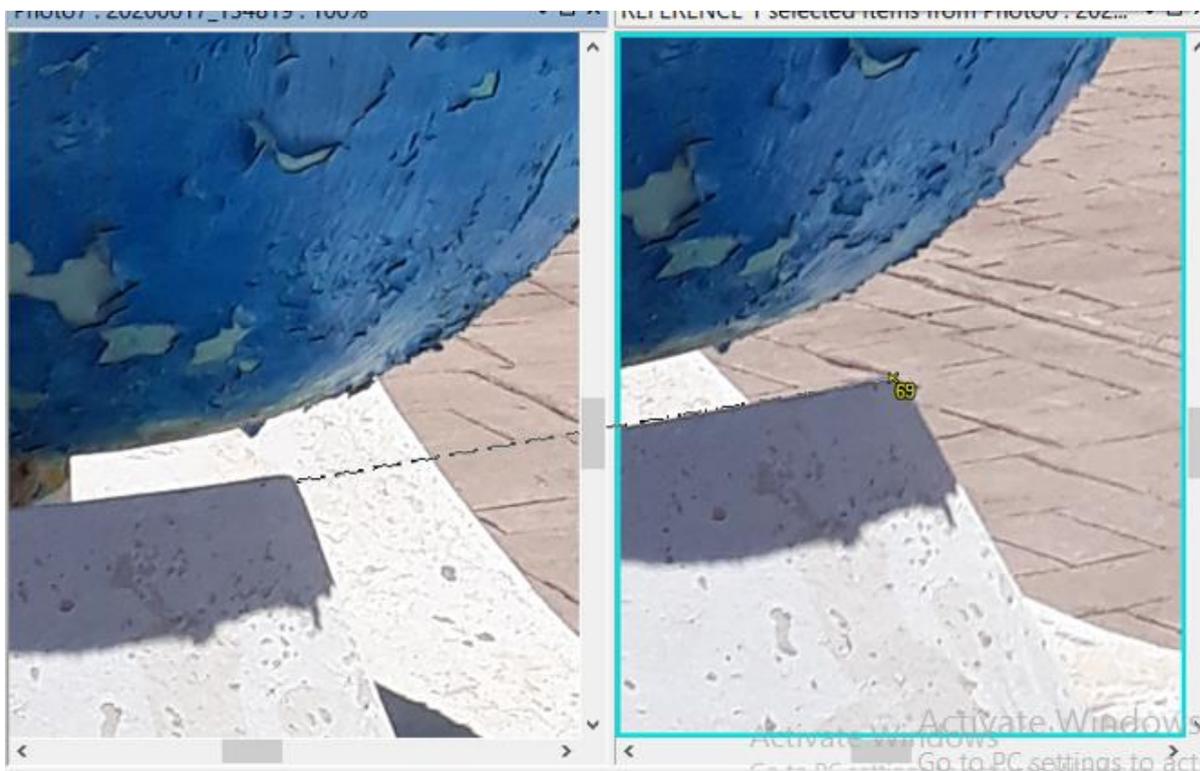


Figure 179 : la correspondre du point N069 son homologue sur la photo de gauche à l'aide de la ligne discontinu

4- Nuage de point séparé

Cette phase peut être lancée séparément comme option sur photomodeller voir figure ci-après



Figure 180 : les paramètres à choisir pour faire la modélisation

Photomodler lance la détection automatique des détails (« feature Detection », la configuration de référencement ou la correspondance entre les pixels « Matching setup », le référencement ; le calcul des orientations des camera lors de prise de vue. Comme il est indiqué dans la Figure 181

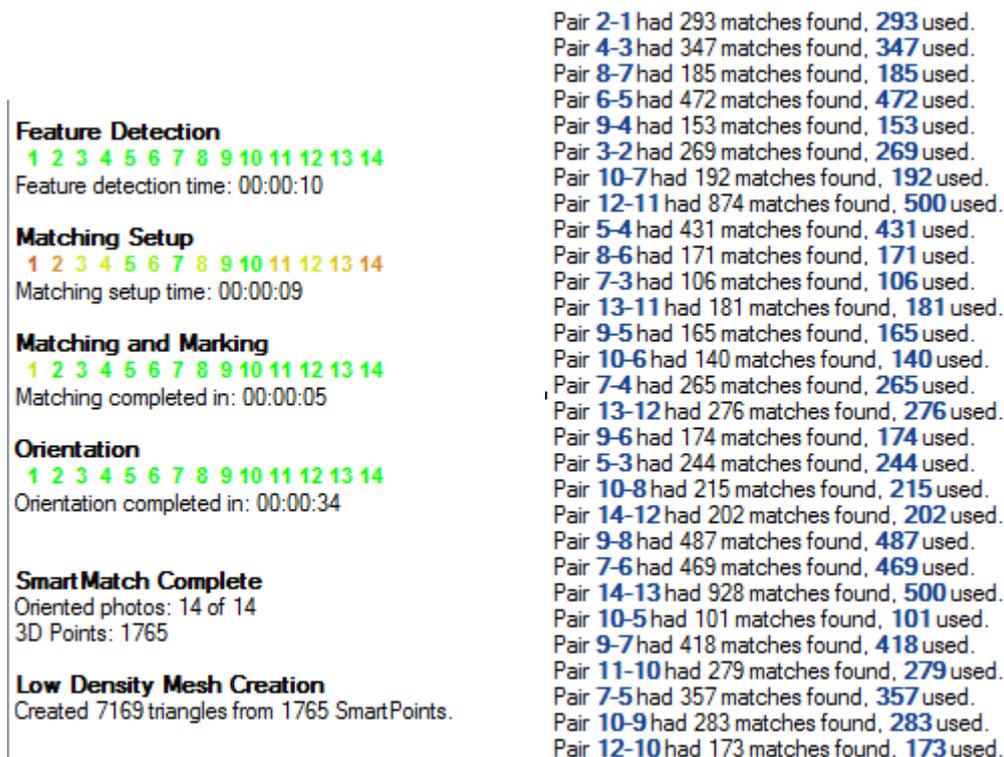


Figure 181 : la détection automatique des images

Mais les résultats de process automatique n'est pas fiable comme l'été claire dans nos premiers essais. Le prétraitement effectué dans les phases antécédentes nous aide à avoir des résultats fiables voir Figure 182



Figure 182 : le résultat de la détection automatique

Effectivement, nous n'avons pas référencier tous les points présentés dans la figure ci-dessus, mais le logiciel a pu détecter d'autres points significatifs dans les photos en se basant sur les points référenciés.

5- Nuage de point densifié

La cinquième étape de traitement est basée obligatoirement sur l'antécédant ; photomodeller recherche les points intermédiaires entre les points séparé afin de densifier le nuage de point.

A partir de cette phase, l'objet devient plus clair malgré qu'il soit représenté seulement par des points.



Figure 183 : résultat de nuage de point densifier

6- Maillage :

Afin de convertir le nuage de points en surface, il faut choisir une méthode de maillage. Généralement la triangulation est celle utilisée actuellement pour ce genre de traitement. Tous les points seront reliés l'un à l'autre par des triangles.

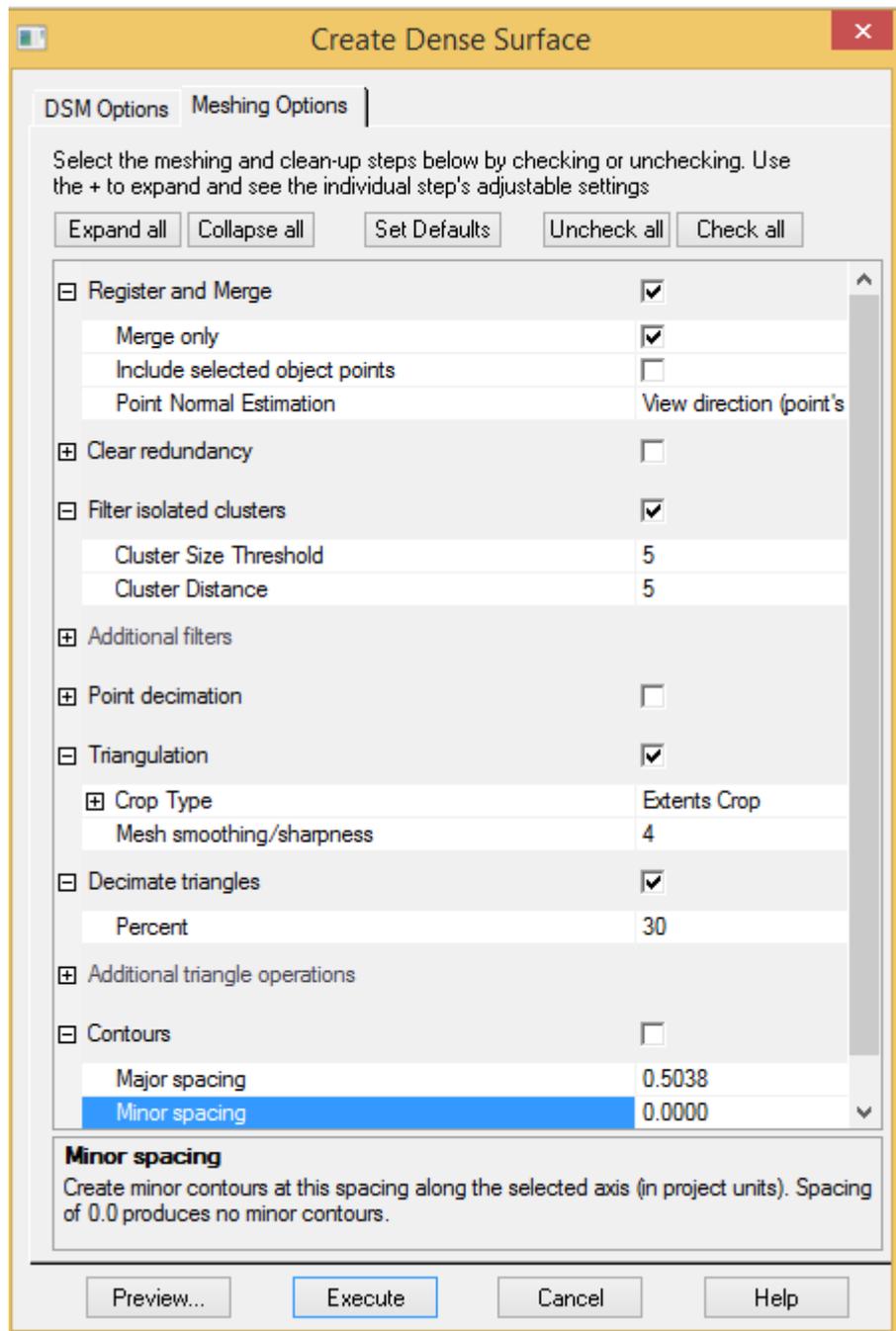


Figure 184 : paramètres du maillage



Figure 185 : résultat du maillage

7- Texturage

En dernier il faut affecter aux triangle un rendu avec éclairage prédéfinie afin de remettre à la photos 3D son aspect de réalisme. On peut éditer la photo texturée afin de supprimer quelques bruits de pixels ou objets indésirables.



Figure 186 : monument détailler sons bruits de pixels ou objets indésirables

Après détailler les étapes de traitement pour le monument « Croissant » nous allons présenter les résultats de chaque traitement pour la deuxième scène qu'on a choisie, la façade extérieure du laboratoire de génie civil.

Il faut noter seulement que nous n'avons pas procédé à la délimitation de l'objet, car la façade ne représenté aucun conflit avec son arrière-plan, elle couvre la totalité de les photos prise.

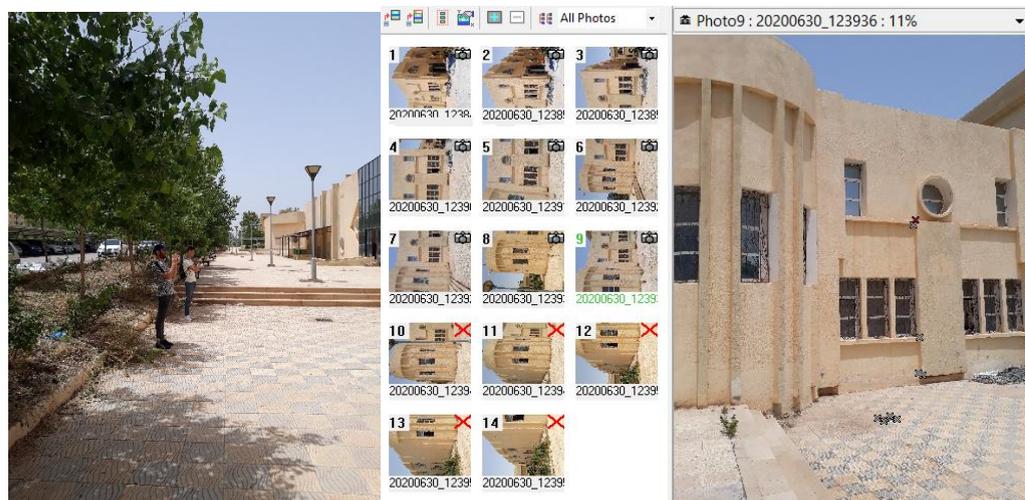


Figure 187 : les prises de vues de la façade choisi



Figure 188 : la correspondance du point N513 dans les trois photos



Figure 189 : nuage des points qui représente la façade



Figure 190 : résultat après maillage



Figure 191 : résultat après texture

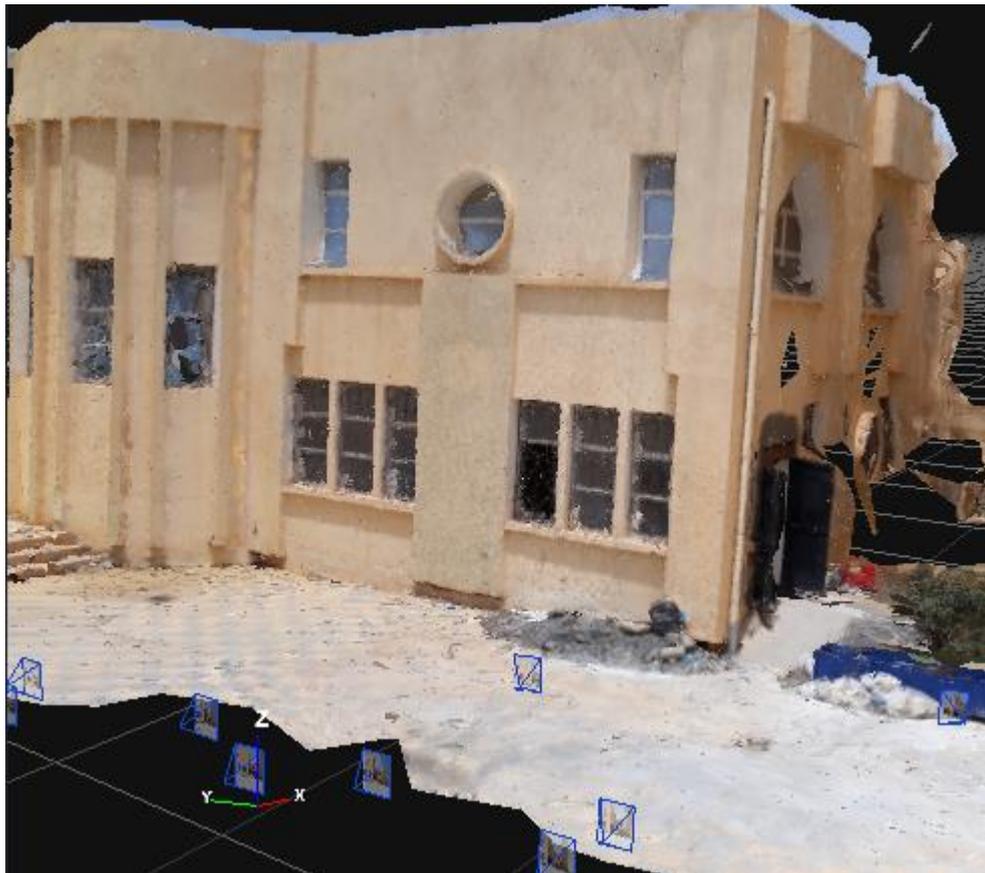


Figure 192 : résultat final du traitement

6. Discussion des résultats

Pour discuter les résultats obtenus à partir des deux scènes antécédentes nous devons faire références au rapport généré par le logiciel et les informations qu'il contient.

La discussion sera focalisée sur la qualité de la reconstitution tridimensionnelle.

Pour le croissant on a enregistré une erreur moyenne quadratique EMQ de 0.7 pixel pour les 27 photos par rapport à 1.7 pour la façade ceci est due probablement à l'éloignement relative de la caméra par rapport à la cible. Plus la distance camera-objet augmente plus la taille du pixel devienne plus grande plus l'erreur de pointage ou de référencement augmente.

Pour le cas du croissant, cette erreur est presque constante sauf pour une seule prise de vue mais pour la façade On remarque que cette erreur est minime, est minime pour les quatre premières photos puis elle augmente puis elle démunie légèrement pour la dernière photo. En révisant les distances pendant la prise de vue pour le deuxième cas nous remarquons que nous avons pris le terre-plein en face de la construction comme référence d'alignement pour les prises de vue, mais la façade n'a pas aligné parallèle au terreplein surtout du côté d'arc ; donc nous serons plus proche de lui de ce côté.

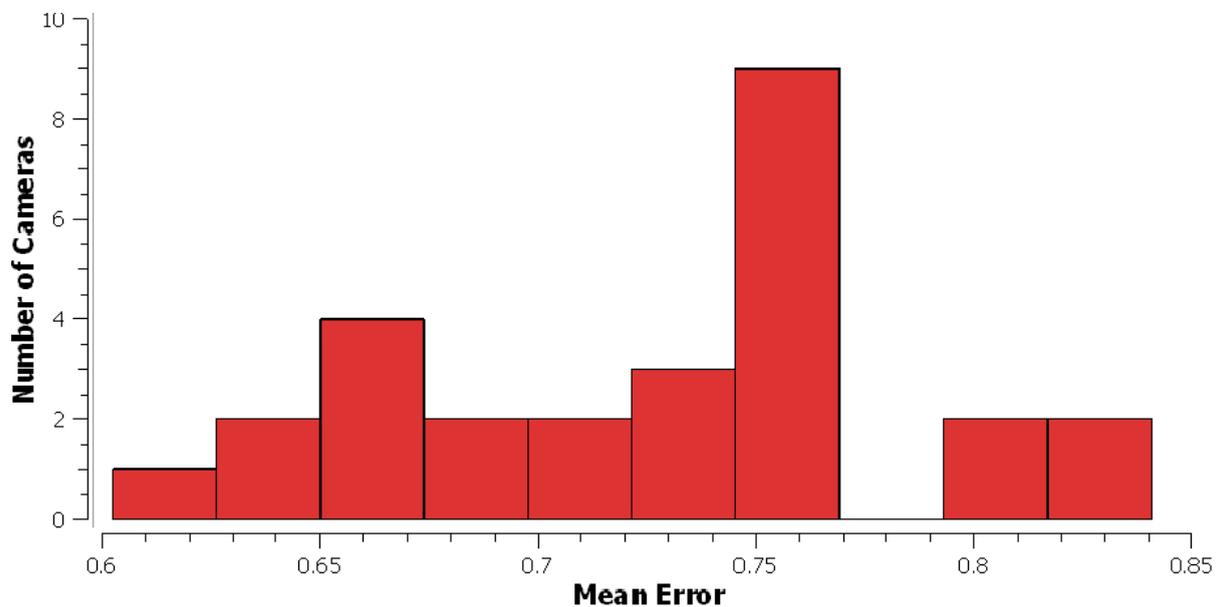


Figure 193 : courbe montre l'erreur du traitement de croissant

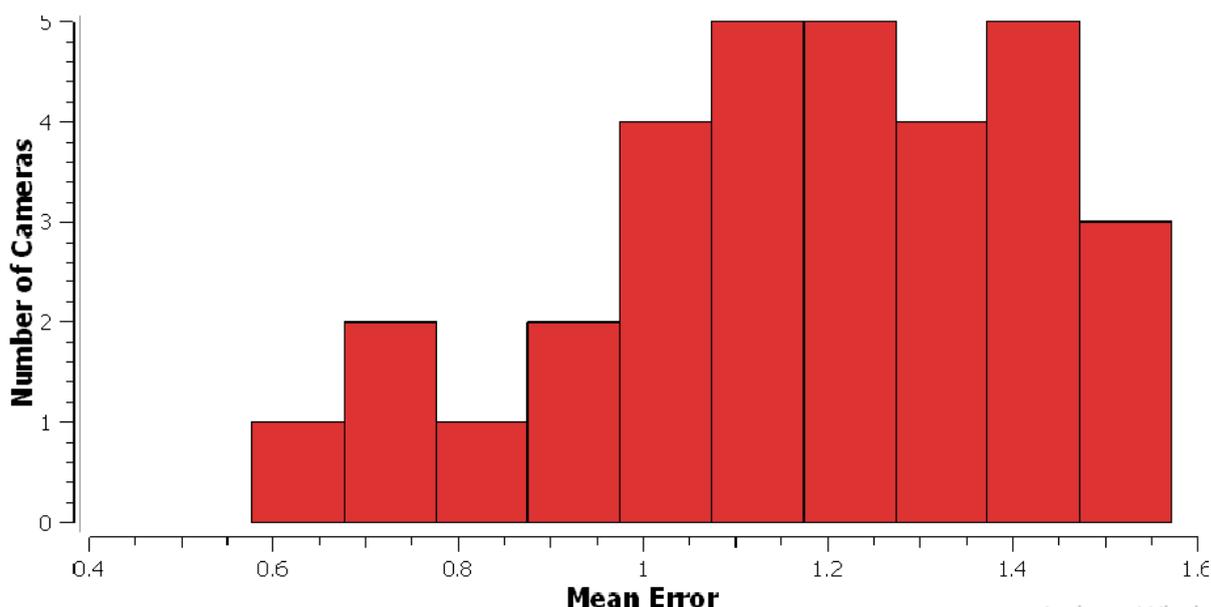


Figure 194 : courbe montre l'erreur du traitement de la façade

En ce qui concerne le temps de traitement selon le rapport en annexe, on remarque qu'il est réduit pour la façade avec 32 photos par rapport aux 27 photos du croissant !

En effet pour faire ressortir un nuage de 2912 points de séparés du croissant il fallait 3min 52s

Et 5min 56s pour 4773 points de la façade ce qui est tout à fait logique

Cependant le décalage de temps est remarquable dans les phases avancées du traitement à savoir celle de maillage et de texturage. Le temps devient inversement proportionnel au nombre de photos des scènes. C'est-à-dire qu'on a enregistré un temps plus élevé pour le croissant par rapport à la façade. Ce qui signifie que le problème de décalage de temps réside non pas dans le nombre de photos mais dans un autre critère.

En se focalisant sur le traitement de triangulation on remarque que pour le croissant on a 4 257 853 triangles par rapport à 331 781 triangles seulement de la façade.

La question qui se pose : pourquoi le croissant ait se nombre assez élevé par rapport à la façade qui représente un objet assez grand par rapport au croissant ?

Selon notre réflexion, la réponse se base sur deux critères de différence entre les scènes étudiées :

La méthode de prise vue et la complexité de la forme géométrique de la scène.

On a choisi la méthode circulaire pour le croissant et la méthode des photos alignées pour la façade, en faisant un tour complet sur la scène ; l'angle kappa (rotation autour de l'axe Z) varie entre 0 à 360° avec déplacement de l'origine du repère 0 progressivement sur (X Y) les angles relié (oméga, phi) ne subissent pas trop de variation. Ce qui n'est pas le cas pour la façade où on enregistre des variations considérable de déplacement sur l'axe Y seulement ; ce qui explique le temps réduit de traitement pour ce dernier et inversement pour le premier.

Le temps de traitement peut être expliqué aussi par le critère de complexité de forme géométrique et le nombre de couleurs associé : le croissant contient des pixels très varié en valeurs sa forme d'arc doublé est plus complexe que la façade qui représente une certaine homogénéité de couleur et de forme géométrique plus simple.

Le dernier point à discuter est celui des déformations remarquables sur les vitres du 1^{er} étage de la façade (voir Figure 195).



Figure 195 : les déformations des vitres du 1er étage de la façade

Ces surfaces représentent des zones d'ombre par rapport à l'angle de prise de vue ; ce manque d'information est rempli par interpolations de valeurs de pixels entre les points visibles.

Enfin, nous pouvons confirmer que la qualité atteinte par camera de téléphone portable peut être pour la reconstitution 3D des petites constructions comme celles étudiées.

Conclusion Générale :

En revenant sur notre introduction générale, nous estimons que nous avons répondu aux questions posées sans abréviation trop courte ni allongement ennuyeux. Nous voyons essentiels de parler en conclusion sur les deux points suivants :

1. La difficulté de ce travail réside dans :
 - La géométrie complexe pour l'extraction des paramètres inconnues soit pour le calibrage ou les paramètres externes.
 - L'inexistence d'un guide standard pour la méthode d'acquisition.
 - Documentation sur la photogrammétrie terrestre en français très rare.
 - Les logiciels photogramétrique nécessite des machines informatiques puissantes.
 - La photogrammétrie terrestre (close range) est limitée dans la distance Camera objet, d'où limitation dans la taille de la scène.
 - Les caméras de téléphone portable ont la plus petite taille du format du capteur (Frame).
 - Les caméras de téléphones portables offrent moins de paramètres de configuration par rapport à la gamme de cameras.

2. Pour la continuité de ce travail, et à travers notre recherche bibliographique nous estimons que les points suivants sont réalisables en se basant sur notre travail :
 - Etude de la qualité de la précision géométrique du modèle 3D reconstruit
 - Exportation et conversion du produit photogramétrique 3D en format vectorielle exploitable par les logiciels DAO (AutoCAD, Midas, ANSYS, REVIT...etc.)
 - Intégration des plans DAO sur la photo 3D ou inversement.
 - Calcul géométrique sur la photo 3D (Profil en long, calcul de volume...etc.)
 - Elaborer des méthodes pour la reconstitution 3D pour des ouvrages ou des constructions plus grandes ou des objets de petite taille pour les travaux pratique dans le laboratoire de génie civil.

Les Annexes :

Annexe 01 : Rapport de calibration

Status Report Tree

Project Name: *** Project has not yet been saved ***

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Thu Mar 12 21:48:20 2020

Version: PhotoModeler UAS 2017.1.1.2199 (64-bit)

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 3

Number of Processing Stages: 2

First Error: 12.422

Last Error: 12.380

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: SM-J730G [3.71]

Focal Length

Value: 4.185767 mm

Deviation: Focal: 0.002 mm

Xp - principal point x

Value: 2.510551 mm

Deviation: Xp: 0.003 mm

Yp - principal point y

Value: 1.798942 mm

Deviation: Yp: 0.003 mm

Fw - format width

Value: 4.935125 mm

Deviation: Fw: 8.6e-004 mm

Fh - format height

Value: 3.710000 mm

K1 - radial distortion 1

Value: -3.578e-003

Deviation: K1: 1.8e-004

K2 - radial distortion 2

Value: 7.948e-004

Deviation: K2: 2.0e-005

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: -1.021e-004

Deviation: P1: 6.1e-005

P2 - decentering distortion 2

Value: 4.589e-004

Deviation: P2: 4.7e-005

Photograph Standard Deviations

Photo 1: 20200312_180030.jpg

Omega

Value: 39.423330 deg

Deviation: Omega: 0.044 deg

Phi

Value: 0.987329 deg	Value: 0.501134
Deviation: Phi: 0.038 deg	Deviation: Y: 8.1e-004
Kappa	Zc
Value: -90.575814 deg	Value: 1.537962
Deviation: Kappa: 0.011 deg	Deviation: Z: 0.001
Xc	Photo 3: 20200312_180119.jpg
Value: 0.531452	Omega
Deviation: X: 8.1e-004	Value: -37.490190 deg
Yc	Deviation: Omega: 0.045 deg
Value: -0.609954	Phi
Deviation: Y: 9.1e-004	Value: 5.440111 deg
Zc	Deviation: Phi: 0.039 deg
Value: 1.576356	Kappa
Deviation: Z: 0.001	Value: 89.693986 deg
Photo 2: 20200312_180052.jpg	Deviation: Kappa: 0.012 deg
Omega	Xc
Value: 1.817721 deg	Value: 0.670274
Deviation: Omega: 0.056 deg	Deviation: X: 8.7e-004
Correlations over 95.0%:	Yc
Kappa:-95.5%	Value: 1.583557
Phi	Deviation: Y: 9.4e-004
Value: 45.523980 deg	Zc
Deviation: Phi: 0.045 deg	Value: 1.638790
Kappa	Deviation: Z: 0.001
Value: -2.789797 deg	Photo 4: 20200312_180155.jpg
Deviation: Kappa: 0.036 deg	Omega
Correlations over 95.0%:	Value: -3.655828 deg
Omega:-95.5%	Deviation: Omega: 0.055 deg
Xc	Phi
Value: 1.869764	Value: -39.519869 deg
Deviation: X: 9.0e-004	Deviation: Phi: 0.046 deg
Yc	

Kappa	Photo 6: 20200312_180226.jpg
Value: 178.395053 deg	Omega
Deviation: Kappa: 0.029 deg	Value: -0.453362 deg
Xc	Deviation: Omega: 0.068 deg
Value: -0.758316	Correlations over 95.0%:
Deviation: X: 0.001	Kappa:-97.2%
Yc	Phi
Value: 0.586812	Value: 49.722419 deg
Deviation: Y: 0.001	Deviation: Phi: 0.039 deg
Zc	Kappa
Value: 1.876180	Value: -89.695049 deg
Deviation: Z: 0.001	Deviation: Kappa: 0.048 deg
Photo 5: 20200312_180213.jpg	Correlations over 95.0%:
Omega	Omega:-97.2%
Value: 48.572050 deg	Xc
Deviation: Omega: 0.037 deg	Value: 1.918775
Phi	Deviation: X: 0.001
Value: 1.996759 deg	Yc
Deviation: Phi: 0.044 deg	Value: 0.630806
Kappa	Deviation: Y: 7.4e-004
Value: 179.055296 deg	Zc
Deviation: Kappa: 0.012 deg	Value: 1.413036
Xc	Deviation: Z: 0.001
Value: 0.615413	Photo 7: 20200312_180238.jpg
Deviation: X: 6.4e-004	Omega
Yc	Value: -46.117499 deg
Value: -0.831428	Deviation: Omega: 0.038 deg
Deviation: Y: 8.8e-004	Phi
Zc	Value: 2.861324 deg
Value: 1.286097	Deviation: Phi: 0.045 deg
Deviation: Z: 9.5e-004	Kappa
	Value: 0.400552 deg

Deviation: Kappa: 0.011 deg

Xc
Value: 0.502983
Deviation: X: 7.0e-004

Yc
Value: 1.851791
Deviation: Y: 9.0e-004

Zc
Value: 1.402625
Deviation: Z: 0.001

Photo 8: 20200312_180259.jpg

Omega
Value: 0.738721 deg
Deviation: Omega: 0.069 deg
Correlations over 95.0%:
Kappa:97.2%

Phi
Value: -49.522675 deg
Deviation: Phi: 0.040 deg

Kappa
Value: 89.513106 deg
Deviation: Kappa: 0.050 deg
Correlations over 95.0%:
Omega:97.2%

Xc
Value: -1.184673
Deviation: X: 0.001

Yc
Value: 0.415291
Deviation: Y: 8.7e-004

Zc
Value: 1.597764

Deviation: Z: 0.001

Photo 9: 20200312_180315.jpg

Omega
Value: 47.517564 deg
Deviation: Omega: 0.037 deg

Phi
Value: -1.427549 deg
Deviation: Phi: 0.043 deg

Kappa
Value: -1.217126 deg
Deviation: Kappa: 0.011 deg

Xc
Value: 0.355175
Deviation: X: 6.8e-004

Yc
Value: -0.793430
Deviation: Y: 9.2e-004

Zc
Value: 1.414123
Deviation: Z: 0.001

Photo 10: 20200312_180325.jpg

Omega
Value: 1.572116 deg
Deviation: Omega: 0.067 deg
Correlations over 95.0%:
Kappa:-97.5%

Phi
Value: 48.565258 deg
Deviation: Phi: 0.039 deg

Kappa
Value: 89.110145 deg

Deviation: Kappa: 0.047 deg
Correlations over 95.0%:
Omega:-97.5%

Xc
Value: 1.869535
Deviation: X: 9.4e-004

Yc
Value: 0.350047
Deviation: Y: 6.9e-004

Zc
Value: 1.376250
Deviation: Z: 0.001

Photo 11: 20200312_180335.jpg

Omega
Value: -45.174115 deg
Deviation: Omega: 0.038 deg

Phi
Value: 6.117338 deg
Deviation: Phi: 0.044 deg

Kappa
Value: -180.365272 deg
Deviation: Kappa: 0.012 deg

Xc
Value: 0.812571
Deviation: X: 7.3e-004

Yc
Value: 1.818951
Deviation: Y: 9.1e-004

Zc
Value: 1.471209
Deviation: Z: 0.001

Photo 12: 20200312_180353.jpg

Omega
Value: 5.239714 deg
Deviation: Omega: 0.067 deg
Correlations over 95.0%:

Kappa:97.0%

Phi
Value: -47.353443 deg
Deviation: Phi: 0.039 deg

Kappa
Value: -86.580780 deg
Deviation: Kappa: 0.046 deg

Correlations over 95.0%:
Omega:97.0%

Xc
Value: -0.955201
Deviation: X: 9.8e-004

Yc
Value: 0.546451
Deviation: Y: 7.7e-004

Zc
Value: 1.496282
Deviation: Z: 0.001

Photo 13: 20200312_180407.jpg

Omega
Value: 5.342578 deg
Deviation: Omega: 0.041 deg

Phi
Value: 1.286674 deg
Deviation: Phi: 0.045 deg

Kappa
Value: -0.536920 deg

Deviation: Kappa: 0.006 deg	Point 37 on Photo 7
Xc	Maximum RMS: 4.574 pixels
Value: 0.479059	Point 10
Deviation: X: 9.2e-004	Minimum RMS: 0.922 pixels
Yc	Point 35
Value: 0.343394	Point Precisions
Deviation: Y: 9.7e-004	Overall RMS Vector Length: 0.000437
Zc	Maximum Vector Length: 0.000724
Value: 1.644946	Point 469
Deviation: Z: 0.001	Minimum Vector Length: 0.000404
Quality	Point 6
Photographs	Maximum X: 0.000379
Total Number: 13	Maximum Y: 0.000326
Bad Photos: 0	Maximum Z: 0.000523
Weak Photos: 0	Minimum X: 0.000196
OK Photos: 13	Minimum Y: 0.000192
Number Oriented: 13	Minimum Z: 0.000291
Number with inverse camera flags set: 0	Point Angles
Cameras	Maximum: 89.99 degrees
Camera1: SM-J730G [3.71]	Point 27
Calibration: yes	Minimum: 60.89 degrees
Number of photos using camera: 13	Point 192
Average Photo Point Coverage: 76%	Average: 87.06 degree
Photo Coverage	
Referenced points outside of the camera's calibrated coverage region:	
Point Marking Residuals	
Overall RMS: 1.598 pixels	
Maximum: 10.110 pixels	
Point 10 on Photo 9	
Minimum: 1.420 pixels	

Structure et mouvement :

Données du projet :

Camera Name	Focal Length	Resolution
samsung SM-J730G	3.7 mm	4128 x 3096

Les statistiques :

3D points per image	289
Oriented cameras	27
BA Mean Square Error	0.700451 px

Paramètres de la caméra interne

Calibrage du caméra :

Camera Model	Skew	Focals	Optical Center	Radial Distortion	Tangential Distortion
samsung SM-J730G	0.000000	X: 3330.802294 Y: 3330.802294	X: 2130.871600 Y: 1525.293931	K1: 0.131613 K2: -0.518398	P1: 0.000000 P2: 0.000000

Points 3D des matches

Erreur de reprojection moyenne :

Image	Visible Points	Mean Reprojection Error
20200617_134751.jpg	331	0.735987
20200617_134758.jpg	393	0.765596
20200617_134803.jpg	365	0.711007
20200617_134807.jpg	336	0.810787
20200617_134811.jpg	338	0.764206

Image	Visible Points	Mean Reprojection Error
20200617_134816.jpg	342	0.752316
20200617_134819.jpg	388	0.749041
20200617_134823.jpg	292	0.753893
20200617_134829.jpg	186	0.737312
20200617_134833.jpg	221	0.649157
20200617_134838.jpg	407	0.602569
20200617_134841.jpg	380	0.663353
20200617_134847.jpg	195	0.800927
20200617_134852.jpg	229	0.748734
20200617_134856.jpg	303	0.732993
20200617_134900.jpg	357	0.670836
20200617_134904.jpg	347	0.686233
20200617_134907.jpg	221	0.830004
20200617_134911.jpg	308	0.704105
20200617_134915.jpg	327	0.652305
20200617_134919.jpg	182	0.658179
20200617_134927.jpg	110	0.682968
20200617_134930.jpg	234	0.762939
20200617_134934.jpg	295	0.754658
20200617_134937.jpg	275	0.643375
20200617_134941.jpg	207	0.840553
20200617_134945.jpg	252	0.755184

Mean GSD	0.00108585
----------	------------

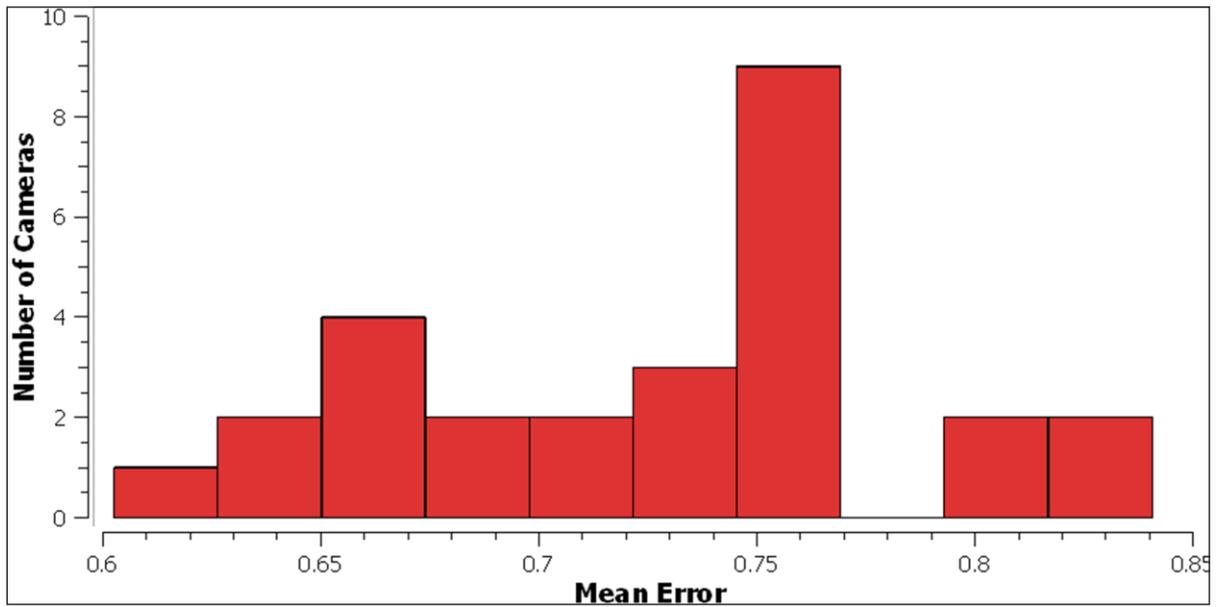


Figure 196 : histogramme d'erreur de reprojection moyenne

Chevauchement de caméra

20200617_134816.jpg

20200617_134819.jpg	60.189%
---------------------	---------

20200617_134819.jpg

20200617_134816.jpg	60.189%
---------------------	---------

20200617_134833.jpg

20200617_134838.jpg	60.1036%
---------------------	----------

20200617_134838.jpg

20200617_134841.jpg	63.3825%
---------------------	----------

20200617_134833.jpg	60.1036%
---------------------	----------

20200617_134841.jpg

20200617_134838.jpg	63.3825%
---------------------	----------

20200617_134852.jpg

20200617_134856.jpg	74.9186%
---------------------	----------

20200617_134856.jpg

20200617_134852.jpg	74.9186%
---------------------	----------

20200617_134900.jpg

20200617_134904.jpg	74.2467%
---------------------	----------

20200617_134904.jpg

20200617_134900.jpg	74.2467%
---------------------	----------

20200617_134911.jpg

20200617_134915.jpg	74.2759%
---------------------	----------

20200617_134915.jpg

20200617_134911.jpg	74.2759%
20200617_134919.jpg	66.8702%

20200617_134919.jpg

20200617_134915.jpg	66.8702%
---------------------	----------

20200617_134930.jpg

20200617_134934.jpg	70.585%
---------------------	---------

20200617_134934.jpg

20200617_134930.jpg	70.585%
20200617_134937.jpg	65.7977%

20200617_134937.jpg

20200617_134934.jpg	65.7977%
---------------------	----------

Nuage de points clairsemé

Informations sur la reconstruction du nuage de points :

Object Name	Sparse Point Cloud
Preset Type	Close Range
Preset Name	Default
Computation Time	0d 0h 3m 52s
Point Count	2912
BA Mean Square Error	0.700451
BA Reference Variance	0

Reconstruction dense

Nuage de points dense 1

Informations sur la reconstruction du nuage de points :

Object Name	Dense point cloud 1
Preset Type	Close Range
Preset Name	Default
Computation Time	0d 0h 5m 58s
Seed Point Count	88555
Total Point Count	445943
Applied Filters	None

Maillage

Maillage 1

Informations sur la reconstruction du maillage :

Object Name	Mesh 1
Preset Type	Close Range
Preset Name	Default
Computation Time	0d 0h 17m 54s

Triangle Count	4254889
Applied Filters	None

Mailles texturées

Mailles texturées 1

Informations de reconstruction de maillage texturé :

Object Name	Textured mesh 1
Preset Type	General
Preset Name	High Details
Computation Time	0d 1h 54m 32s
Triangle Count	4257853
Texture Count	1
Applied Filters	None

Points de contrôle :

Name	X	Y	Z	Visible Cameras	Error (pixels)
GCP 1	7959.140219	46430.421732	1.199285	0	N/A
GCP 2	7958.972823	46430.839061	1.181548	0	N/A
GCP 3	7959.689024	46430.673727	0.556191	4	0.000000
GCP 4	7959.077468	46430.337919	0.873524	5	0.000000
GCP 5	7959.145009	46431.616371	3.210364	3	0.000000
GCP 6	7957.865532	46430.036459	3.202629	5	0.000000
GCP 7	7958.453332	46430.151386	1.438764	2	0.000000

Alignment Information:

Final Mean residual: 0m

Constraints residuals:

Constraint 0 Final residual: 0 (Before: 37.4353) m

Structure et mouvement

Données du projet

Caméra :

Camera	Focal	Resolution
Name	Length	
samsung SM-J730G	3.7 mm	4128 x 3096

Statistiques :

3D points per image	500
Oriented cameras	32
BA Mean Square Error	1.98107 px
BA Reference Variance	6.30798 px

Paramètres interne de la caméra

Calibrage de la camera :

Camera	Skew	Focals	Optical	Radial	Tangential
Model			Center	Distortion	Distortion
samsung SM-J730G	0.000000	X: 3379.724623 Y: 3379.724623	X: 2050.747310 Y: 1534.151247	K1: 0.156519 K2: -0.715345	P1: 0.000000 P2: 0.000000

Points 3D à partir de correspondances

Erreur de reprojection moyenne :

Image	Visible Points	Mean Reprojection Error
20200630_123320.jpg	621	1.1234
20200630_123329.jpg	776	1.18311
20200630_123336.jpg	771	1.26769
20200630_123344.jpg	575	1.31481

Image	Visible Points	Mean Reprojection Error
20200630_123351.jpg	459	1.17078
20200630_123358.jpg	631	1.09435
20200630_123406.jpg	474	1.29852
20200630_123842.jpg	233	0.77286
20200630_123850.jpg	353	0.854596
20200630_123857.jpg	343	1.41444
20200630_123904.jpg	519	1.53898
20200630_123910.jpg	605	1.32881
20200630_123922.jpg	660	1.14229
20200630_123928.jpg	613	1.52488
20200630_123934.jpg	517	1.35133
20200630_123936.jpg	574	1.17953
20200630_123942.jpg	277	1.05316
20200630_123948.jpg	604	0.934049
20200630_123951.jpg	537	0.941519
20200630_123957.jpg	27	0.743053
20200630_123958.jpg	22	0.576664
20200630_124937.jpg	327	1.0358
20200630_124940.jpg	420	1.572
20200630_124945.jpg	345	1.46549
20200630_124950.jpg	618	1.21784
20200630_124954.jpg	788	1.12037
20200630_124959.jpg	713	1.37928
20200630_125002.jpg	578	1.23658
20200630_125007.jpg	345	1.39087
20200630_125010.jpg	329	1.41221
20200630_125014.jpg	680	1.01815
20200630_125017.jpg	670	1.05447

Mean GSD	0.0042352
----------	-----------

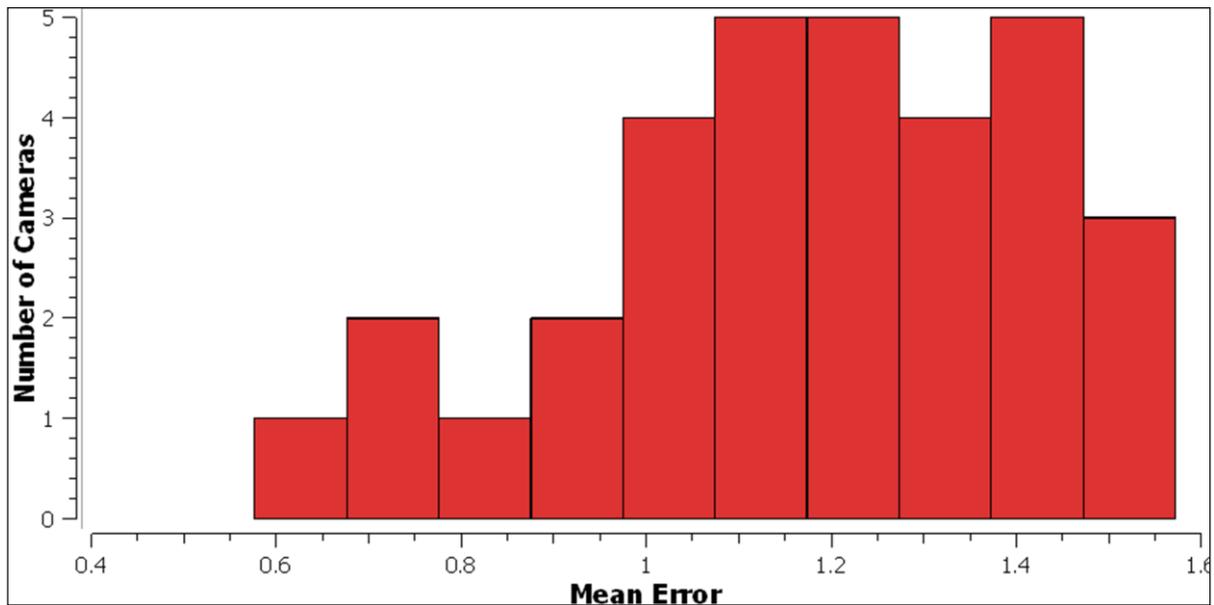


Figure 197 : Histogramme d'erreur de reprojection moyenne

Chevauchement de caméra

20200630_123320.jpg

20200630_123922.jpg	62.4899%
20200630_124950.jpg	61.6106%

20200630_123329.jpg

20200630_124954.jpg	75.2955%
20200630_123336.jpg	60.824%

20200630_123336.jpg

20200630_124959.jpg	63.0927%
20200630_123910.jpg	62.4376%
20200630_124954.jpg	62.1889%
20200630_123329.jpg	60.824%

20200630_123358.jpg

20200630_125014.jpg	73.7834%
20200630_125017.jpg	70.0506%

20200630_123406.jpg

20200630_125017.jpg	76.4578%
20200630_125014.jpg	71.2765%

20200630_123910.jpg

20200630_124959.jpg	63.2253%
20200630_124954.jpg	62.8585%
20200630_123336.jpg	62.4376%

20200630_123922.jpg

20200630_123320.jpg	62.4899%
---------------------	----------

20200630_123942.jpg

20200630_123948.jpg	61.2311%
---------------------	----------

20200630_123948.jpg

20200630_123942.jpg	61.2311%
---------------------	----------

20200630_124950.jpg

20200630_123320.jpg	61.6106%
---------------------	----------

20200630_124954.jpg

20200630_123329.jpg	75.2955%
20200630_123910.jpg	62.8585%
20200630_123336.jpg	62.1889%

20200630_124959.jpg

20200630_123910.jpg	63.2253%
20200630_123336.jpg	63.0927%

20200630_125014.jpg

20200630_125017.jpg	84.7677%
20200630_123358.jpg	73.7834%
20200630_123406.jpg	71.2765%

20200630_125017.jpg

20200630_125014.jpg	84.7677%
20200630_123406.jpg	76.4578%
20200630_123358.jpg	70.0506%

Nuage de points clairsemé

Informations sur la reconstruction du nuage de points :

Object Name	Sparse Point Cloud
Preset Type	Urban
Preset Name	Default
Computation Time	0d 0h 5m 26s
Point Count	4773
BA Mean Square Error	1.98107
BA Reference Variance	6.30798

Reconstruction dense

Nuage de points dense 1

Informations sur la reconstruction du nuage de points :

Object Name	Dense point cloud 1
Preset Type	Urban
Preset Name	High Details
Computation Time	0d 0h 58m 12s
Seed Point Count	494746
Total Point Count	2533938
Applied Filters	None

Maillage

Maillage 1

Informations sur la reconstruction du maillage :

Object Name	Mesh 1
Preset Type	Urban
Preset Name	Default
Computation Time	0d 0h 33m 2s
Triangle Count	331781
Applied Filters	None

Mailles texturées

Mailles textures1

Informations de reconstruction de maillage texturé :

Object Name	Textured mesh 1
Preset Type	General
Preset Name	High Details
Computation Time	0d 0h 11m 15s
Triangle Count	331781
Texture Count	2
Applied Filters	None

Bibliographie :

- [1] P. R. Wolf, B. A. Dewitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 4th ed.* 696 pp. 2014.
- [2] D. Z. Seker and Z. Duran, "Terrestrial & Numerical," pp. 1–40.
- [3] T. Schenk, "Introduction to Photogrammetry," *Dep. Civ. Environ. Eng. Geod. Sci. Ohio State Univ.*, pp. 79–95, 2005, [Online]. Available: http://gscphoto.ceegs.ohio-state.edu/courses/GeodSci410/docs/GS410_02.pdf.
- [4] Wikipedia, "Photogrammétrie Principe général," 2020. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photogrammétrie>.
- [5] satpalda.com, "Concepts Of Photogrammetry _ SATPALDA." <https://www.satpalda.com/blogs/concepts-of-photogrammetry#:~:text=The fundamental principle used by,to points on the object.&text=Change in position of an,is caused by aircraft's motion>.
- [6] R. Jiang, D. V. J uregui, and K. R. White, "Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 41, no. 8, pp. 823–834, 2008, doi: 10.1016/j.measurement.2007.12.005.
- [7] R. K. Rhodes, "UAS as an Inventory Tool: A Photogrammetric Approach to Volume Estimation," p. 115, 2017, [Online]. Available: <http://scholarworks.uark.edu/etd/2424/>.
- [8] M. Chodoronek, "The Use and Application of Photogrammetry for the In-field Documentation of Archaeological Features : Three Case Studies from the Great Plains and Southeastern Alaska," 2015, [Online]. Available: <http://digitalcommons.unl.edu/anthrotheseshttp://digitalcommons.unl.edu/anthrotheses/38>.
- [9] F. Norizan, M. F. Abd Rashid, Z. Ibrahim, R. Sa'ari, Z. Ibrahim, and M. Mustaffar, "The Application of Digital Close Range Photogrammetry for," *11th Int. Civ. Eng. Post Grad. Conf. (SEPKA 2016) - 1st Int. Symp. Expert. Eng. Des. (1st ISEED 2016) Malaysian J. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 252–266, 2016.
- [10] H. Vd, " l ments de photogrammétrie Cours de photo - interprétation," 2010.
- [11] T. Marie-Laure, "Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d' images pour l' étude des ouvrages rocheux," 2012.
- [12] H. H. Universit, *De Gruyter Textbook Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. .
- [13] diydrones.com, "Aerial photogrammetry," *Nature*, 2014. <https://diydrones.com/profiles/blogs/aerial-photogrammetry-vs-terrestrial-photogrammetry>.
- [14] W. Linder, *Digital Photogrammetry*. 2005.
- [15] Quora.com, "What are the advantages of ultracapacitors ?," 2018. <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-of-terrestrial-photogrammetry>.
- [16] inrap.fr, "Actualit  _ Entretien _ « La photogrammétrie, une alli e d' » 2020. https://www.inrap.fr/entretien-la-photogrammetrie-une-alliee-de-l-archeologie-preventive-15050?fbclid=IwAR2G3lIFCdpai08UIUL5RZelXCjl_rOrkdHLoh9tMqc2_FhlgR_8kBvKm6w.
- [17] Geodetic Systems, "Basics of Photogrammetry – Geodetic Systems, Inc." <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/>.
- [18] E. Sanz-Ablanedo, J. H. Chandler, and R. Wackrow, "Parameterising Internal Camera Geometry with Focusing Distance," *Photogramm. Rec.*, vol. 27, no. 138, pp. 210–226, 2012, doi: 10.1111/j.1477-

9730.2012.00677.x.

- [19] journaldunet.fr, "Pixel _ définition," 2019. <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1203295-pixel-definition/>.
- [20] futura-sciences.com, "Définition | Pixel - Picture element | Futura Tech." <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-pixel-591/>.
- [21] larousse.fr, "Définitions _ pixel - Dictionnaire de français Larousse." <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/pixel/61248>.
- [22] Snapshot.canon-asia.com, "Lens Basics #5_ Perspective," 2017. <https://snapshot.canon-asia.com/article/en/lens-basics-5-perspective#:~:text=Perspective refers to the visual,1>.
- [23] K. Schindler, "Mathematical foundations of photogrammetry," *Handb. Geomathematics Second Ed.*, pp. 3087–3103, 2015, doi: 10.1007/978-3-642-54551-1_63.
- [24] Photographylife.com, "What is Lens Distortion !," 2020. <https://photographylife.com/what-is-distortion>.
- [25] W. Förstner and B. P. Wrobel, *Photogrammetric Computer Vision*. .
- [26] sites.google.com, "stereoscopie." .
- [27] A. Society, C. Aim, T. Prior, L. P. S. Project, and M. Introduction, "Introduction / 16 LPS Project Manager," 1994, [Online]. Available: <http://www.gisresources.com/wp-content/uploads/2013/11/Introduction-to-Photogrammetry-LPS.pdf>.
- [28] 3Dflow srl, "3DF Zephyr Tutorials," *3Dflow.Net*, 2019. <https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-tutorials/>.
- [29] photomodeler.com, "Préréglages de cibles codées de PhotoModeler _ PhotoModeler." .
- [30] L. Daoud, "Étude de la capacité de la photogrammétrie sans cibles pour la mesure de tuyauteries Labib Daoud To cite this version : HAL Id : tel-01199603," 2015.
- [31] wikiwand.com, "Modèle numérique de terrain - Wikiwand," 2013. https://www.wikiwand.com/fr/Modèle_numérique_de_terrain.
- [32] S. Kotz, "Difference between Satellite Imagery & Aerial Photography," 2019. <https://sciencing.com/difference-satellite-imagery-aerial-photography-8621214.html>.
- [33] D. Gillies, *Close Range Photogrammetry*, vol. 30, no. 151. 2015.
- [34] wikipedia.org, "Objectif photographique — Wikipédia," 2020. https://fr.wikipedia.org/wiki/Objectif_photographique.
- [35] xlsoft.com, "PhotoModeler Overview - Accurate and Affordable 3D Modeling - Measuring - Scanning _ XLsoft Corporation." <https://www.xlsoft.com/en/products/photomodeler/overview.html#how-it-works>.
- [36] Xlsoft.com, "PhotoModeler Premium - Photo-based 3D scanning tools to create high quality 3D models _ XLsoft Corporation." <https://www.xlsoft.com/en/products/photomodeler/photomodeler-premium.html>.
- [37] 3dflow.net, "3DF Zephyr photogrammetry software full features list," 2020. <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-feature-comparison/>.
- [38] numerisation3d.construction, "Photogrammétrie _ Comment bien prendre les photos _ Numérisation 3D & Construction." <https://numerisation3d.construction/photogrammetrie-comment-prendre-photos/?v=79cba1185463>.
- [39] "Copyright © 2013 by 3Dflow srl. All Rights Reserved.," 2013.

- [40] universalis.fr, "PHOTOGRAMMÉTRIE, Applications - Encyclopædia Universalis." <https://www.universalis.fr/encyclopedie/photogrammetrie/4-applications/>.
- [41] H. Huang, J. Liu, H. Li, Y. Zhang, J. Gao, and Y. Tian, "Application of Close-Range Photogrammetric Technology to Monitor Slope Deformation," no. Iccet, pp. 832–835, 2015, doi: 10.2991/iccet-15.2015.155.
- [42] I. Balenović *et al.*, "Digital Photogrammetry – State of the Art and Potential for Application in Forest Management in Croatia," *South-east Eur. For.*, vol. 2, no. 2, pp. 81–93, 2011, doi: 10.15177/seefer.11-09.
- [43] M. A. Aguilar *et al.*, "Application of close-range photogrammetry and digital photography analysis for the estimation of leaf area index in a greenhouse tomato culture," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 38, no. PART 5, pp. 5–10, 2010, [Online]. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84896969703&partnerID=tZOtx3y1>.
- [44] B. Y. M. Chan, I. J. Saul, T. J. Pettigrew, and D. J. Anstice, "Photogrammetric Modelling for Bridge Inspection and Remediation," *8th Aust. Small Bridg. Conf.*, pp. 1–14, 2017.
- [45] H. Ara, "Application of Photogrammetry to Bridge Monitoring," *Twelfth Int. Conf. Struct. Faults Repair*, 2008.
- [46] C. Popescu, B. Täljsten, T. Blanksvärd, and L. Elfgrén, "3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 912–924, 2019, doi: 10.1080/15732479.2019.1594315.
- [47] Y. Ahn and S. Peterson, "Bridge Monitoring Using a Digital Camera : Photogrammetry-based Bridge Dynamics Monitoring," no. October, 2019.
- [48] P. Faure, M. P. Deseilligny, and V. Tournadre, "LES NOUVELLES TECHNIQUES TOPOGRAPHIQUES 3D SURFACIQUES POUR," no. June, 2015.
- [49] D. C. Gärdin and A. Jimenez, "Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges," 2018.
- [50] M. Deplancke, "Etude de précision de la photogrammétrie terrestre appliquée aux levés topographiques," vol. 26.
- [51] J. Han, K. Hong, and S. Kim, "Application of a Photogrammetric System for Monitoring Civil Engineering Structures," *Spec. Appl. Photogramm.*, 2012, doi: 10.5772/34906.
- [52] S. Pal Singh, K. Jain, and V. R. Mandla, "Virtual 3D Campus Modeling by Using Close Range Photogrammetry," *Am. J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 1, no. 6, pp. 200–205, 2013, doi: 10.12691/ajcea-1-6-9.
- [53] nezzus.com, "L'AVANTAGE DES LEVES TOPOGRAPHIQUES PAR LE DRONE." .
- [54] Droneworxs.com, "Services de cartographie par drone _ Cartographie de drone _ Cartographie aérienne." .
- [55] Y. Wang, "TECHNOLOGIES," pp. 655–662, 2017.
- [56] T. Schenk and P. Srestasathiern, "Introduction to Photogrammetry," *Dep. Civ. Environ. Eng. Geod. Sci. Ohio State Univ.*, pp. 79–95, 2014, [Online]. Available: http://artsa.gistda.or.th/wp-content/uploads/2017/09/1-Introduction-to-Photogrammetry.pdf%0Ahttp://gscphoto.ceegs.ohio-state.edu/courses/GeodSci410/docs/GS410_02.pdf%0Ahttp://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf.
- [57] svksystems.com, "SVK Systems." <https://www.svksystems.com/Photogrammetry.html>.
- [58] xyht.com, "Optical Monitoring - xyHt," 2015. <https://www.xyht.com/civiltransportation/optical-monitoring/>.
- [59] C. Emmanuel, "Introductions," 2019.

- [60] Photomodeler, *CalibrationPart1*. .
- [61] Photomodeler, "PhotoModelerCalibrationGrid.pdf." .
- [62] L. Lanzi, "La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques," *PhD thesis*, p. 254, 2009.
- [63] aniwaa.fr, "Applications de scan 3D Android_iOS 2020 _ top 8," 2020. <https://www.aniwaa.fr/guide-achat/scanners-3d/meilleures-applications-smartphone-scan-3d/>.