

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain T'émouchent Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences et de la technologie

Département de science de la nature et de la vie

Filière : Science Agronomique



Spécialité : Protection des végétaux

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

Thème

Reconstitution 3D d'espèces végétales par photogrammétrie

Présenté par :

Mr. Smaine Housseyn Mezyane

Mlle. Chenafi Halima Essadia

Soutenu le : 14/07/2021

Devant le jury composé de :

Mlle BENAHMED Meriem

Présidente

Mme ABDELLAOUI Hadjira Houria

Examinatrice

Mr KADDOUR Hakim

Encadreur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2021 / 2022

DEDICACE

إلى والديّ الأعرّاء على كل تضحياتهم وحبهم وحنانهم ودعمهم وصلواتهم

طوال فترة دراستي.

إلى أخواتي العزيزات على تشجيعهم الدائم ودعمهم المعنوي.

إلى إخواني الأعرّاء، على دعمهم وتشجيعهم.

إلى جميع زملائي في الترقية.

شكرًا لكم على وجودكم دائمًا معنا.

HOUSSEYN

DEDICACE

أهدي هذا العمل لوالدي.

إخوتي وأخواتي.

وخاصة ملائكتي ابن أخي العزيز عبد الهادي وابنة أخي العزيزة ياسمين.

كما أهدي جميع شكري لم ساعدني ووقف معي في مشواري الدراسي.

تحية كبيرة لزملائي في الدراسة.

شكرا لكم على وقوفكم معنا.

HALIMA

REMERCIMENT

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي انار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على إتمام عملنا هذا

نتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان والتقدير لأستاذنا "قدور حكيم" المشرف على هذه الرسالة،

الذي له الفضل بعد الله عز وجل لما قدمه لنا من معلومات ومراجع مع ما لقينا منه من رحابة

صدر وبشاشة وجهه، نسأل الله ان يجازيه خير الجزاء وان يكتب صنيعه في موازين حسناته.

كما نشكر أستاذتنا الغالية "عبد اللاوي هجيره" على كل ما قدمته لنا في مسيرتنا الجامعية، كانت

ولا زالت أهل العطاء والعمل حفظها الله وأطال في عمرها.

نوجه الشكر أيضا الى استاذتنا "بن احمد مريم" على قبولها ترأس لجنة التحكيم وفحص هذا العمل

المتواضع.

كما أهدي شكري الخاص الي أغلى خال "بلحسن بوعلام" لكل معلوماته القيمة والذي لم يبخل

بشيء تجاهي اطال الله في عمره.

كما نهدى أيضا شكرنا لوالدينا وكل أصدقائنا الذين كانوا سندنا لنا في شتى الظروف والاوقات

وعلى دعمهم المادي والمعنوي.

Avant-propos

L'un des puissants outils géomatiques d'acquisition des données est la photogrammétrie, elle a pris part dans divers domaines notamment en science de la nature. L'objectif du sujet proposé est de présenter les concepts de base sur cette technique spécialement la photogrammétrie terrestre, de mettre en valeur son importance à travers des essais de reconstitution réel sur des différentes espèce végétales.

Cet objectif nécessite une base théorique en photogrammétrie numérique, en géométrie 3D, et une manipulation préalable sur des logiciels DAO et de traitement d'image. Enfin des ressources matérielles spécifique est indispensable pour ce travail.

Ce prérequis est totalement absent chez les étudiants des sciences de la nature et particulièrement ceux de la spécialité protection des végétaux.

Malgré ces contraintes les étudiants Mr Mezyane Smaine et Melle Chenafi Halima 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 maîtriser le logiciel Photomodeler, et la méthodologie pratique pour la reconstitution 3D des plantes.

Le résultat de cette étude est concrétisé par une reconstitution 3D de plusieurs plantes avec une qualité remarquable et inattendue de ma part surtout qu'ils ont utilisé une simple caméra de téléphone portable pour l'acquisition des photos.

Je considère que leur travail et ce mémoire représente une référence pour les travaux ultérieurs sur le même axe de recherche. Je remercie mes étudiants pour les efforts déployés.

L'encadreur : KADDOUR Hakim

Résumé :

La photographie prise sur les plantes pour des fins analytiques représente un document assez riche d'information ; par ailleurs elle est limitée par l'absence de l'échelle géométrique et l'angle de prise de vue.

Le but de ce mémoire est de soulever cette dernière limitation et ceci par l'utilisation de la technique de la photogrammétrie terrestre basé sur le principe de la stéréoscopie 3D.

En effet, en utilisant une série de photos par une caméra ordinaire après son calibrage, sur des espèces végétales de différents types, de taille et de géométrie. Nous avons pu attendre une qualité de reconstruction tridimensionnelle avec une précision 0.4 pixel malgré la complexité géométrique des espèces photographiées.

Ce mémoire décrit aussi la méthodologie pratique et de traitement pour une telle reconstitution.

Mots-clés : Photogrammétrie terrestre, stéréoscopie, reconstitution 3D.

ملخص:

تعد الصور التي يتم التقاطها للنباتات بغرض التحليل وثيقة غنية بالمعلومات الا انها مقيدة بغياب المقياس الهندسي وزاوية الرؤية.

الغرض من هذه الرسالة هو تجاوز هذا القيد الاخير (اي زاوية الرؤية) وذلك باستخدام تقنية المسح التصويري الارضي المرتكزة على مبدأ التصوير المجسمي ثلاثي الابعاد.

من اجل ذلك التقطنا سلسلة من الصور لنباتات مختلفة النوع والحجم والشكل بواسطة كاميرا عادية بعد معايرتها وبعد معالجة الصور تحصلنا على جودة اعادة مجسم ثلاثي الابعاد بدقة 0.4 بكسل على الرغم من التعقيد الهندسي لأنواع النباتات التي تم تصويرها.

تصف هذه الرسالة ايضا المنهجية المتبعة لمثل هذه العملية وكيفية اعادة بناء مجسم رقمي ثلاثي الابعاد للنباتات المختارة.

كلمات المفتاح: مسح تصويري ارضي، التصوير المجسمي ثلاثي الابعاد، اعادة بناء رقمي ثلاثي الابعاد.

Abstract:

Photographs taken on plants for analytical purposes represent a very rich document of information; however, it is limited by the absence of the geometric scale and the angle of view.

The purpose of this thesis is to raise this last limitation and this by using the technique of terrestrial photogrammetry based on the principle of 3D stereoscopy.

Indeed, using a series of photos by an ordinary camera after its calibration, on plant species of different types, sizes and geometry. We were able to expect a three-dimensional reconstruction quality with an accuracy of 0.4 pixel despite the geometric complexity of the species photographed.

This dissertation also describes the practical and processing methodology for such a reconstruction

Keys words: close range photogrammetry, stereoscopy, 3D reconstitution.

Sommaire

DEDICACE.....	II
REMERCIEMENT.....	IV
Avant-propos.....	V
Résumé :.....	VI
:ملخص.....	VII
Abstract:.....	VIII
Sommaire.....	IX
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux.....	XIV
Introduction générale :.....	1
Chapitre 1 : Concepts de base.....	2
1 Historique :.....	4
2 Définition :.....	7
3 Type de photogrammétrie :.....	7
3.1 PHOTOGRAMMETRIE AERIENNE :.....	7
3.2 PHOTOGRAMMETRIE TERRESTRE :.....	10
4 Principe de fonctionnement de la photogrammétrie:.....	11
4.1 TYPES DE PROJECTIONS :.....	12
5 Les paramètres internes :.....	13
5.1 LES DISTORSIONS :.....	14
5.2 LES ONGLES OMEGA, PHI, KAPPA :.....	15
5.3 LA DISTANCE FOCAL :.....	16
5.4 L'ANGLE SOLIDE :.....	16
5.5 LES TROIS ROTATIONS DE LA CAMERA :.....	17
5.6 LES PARAMETRES DE CONFIGURATION :.....	17
5.7 L'OUVERTURE :.....	18
6 Les paramètres externes :.....	18
7 Problèmes liés à la photo :.....	19
7.1 LA PERSPECTIVE :.....	19
7.2 L'ABSENCE DE L'ECHELLE :.....	20

8	Le calibrage de l'appareil :	21
	Chapitre 2 : La vision 3D	26
	1.Principe de la stéréoscopie :	27
	1.1 MONTAGE DES IMAGES :	28
	1.2 LES APPAREILS PHOTOS STEREOCOPIQUES :	30
	1.3 L'ANGLE DE PRISE DE VUE :	33
	1.3.1 Recouvrement :	33
	1.3.2 Parcours linéaire direct :	33
	1.3.3 Parcours linéaire multiple :	35
	2.La reconstitution par triangulation :	36
	3.Modèle numérique de terrain et de surface:	37
	4.Les ortho photographies ou ortho images :	38
	4.1 USAGES DES ORTHO PHOTOGRAPHIES :	39
	5.Etape de traitement de reconstitution 3D :	39
	5.1. TRAITEMENT D'IMAGE UNIQUE :	41
	5.2. TRAITEMENT STEREOCOPIQUE :	41
	5.3. TRAITEMENT MULTI-IMAGE :	42
	Chapitre 3 : Etat de l'art de la photogrammétrie terrestre	43
	1. Applications actuelles de la photogrammétrie :	44
	2. Dans le domaine végétal :	44
	3. Type d'appareils photographique :	48
	4. Problèmes liés à la photogrammétrie de la végétation :	50
	Chapitre 4 : Application	52
	1. Introduction :	53
	2. Logiciel utilisé :	53
	3. Essais de reconstitution 3D	55
	4. La méthodologie.....	57
	5.Phase de prétraitement :	57
	6.Phase d'Acquisition :	61
	7. Phase de Traitement :	63
	8.Résultat et discussion :	71

Bibliographie : 80

Liste des figures

Figure 1:Photogrammétrie restituteur analogique.[3]	5
Figure 2: Restituteur analytique de photogrammétrie.[3]	5
Figure 3 : Photogrammétrie numérique.[3]	6
Figure 4:Exemple de photogrammétrie aérienne.[10].....	8
Figure 5:Photogrammétrie aérienne par drone.[11]	8
Figure 6:DJI Phantom 4 utilisé pour les relevés Photogrammétrique.[13]	9
Figure 7: Appareil pour les levés architecturales par Photogrammétrie terrestre combinais avec GPS de précision et un cymomètre.[15].....	10
Figure 8 : Facteurs entrant dans le calcul des paramètres de la caméra.[16].....	11
Figure 9:Les deux types de projection.[19].....	12
Figure 10:Géométrie des différents paramètres internes de l'appareil photographique.[20].....	13
Figure 11:Effets de la distorsion radiale [21]	14
Figure 12: Angles de rotation kappa, Phi, Omega [22].....	15
Figure 13: Distance focale.....	16
Figure 14: L'angle solide [23].....	16
Figure 15: Effet de l'ouverture sur la qualité de la photo [20].....	18
Figure 16: Les paramètres externes de la caméra.[24]	18
Figure 17: Exemple d'image en perspective.....	19
Figure 18: Exemple d'absence de l'échelle sur la photo.....	20
Figure 19: Grille de calibrage Photomodeler [20].....	22
Figure 20: Première capture à 90° [20].....	22
Figure 21: Deuxième capture à 0° [20].....	23
Figure 22:Troisième capture à -90 [20].....	23
Figure 23: Quatrième capture à 180° [20].....	23
Figure 24: Le type de camera dans les métadonnées d'une image photographié dans l'onglet des propriétés de la photo.....	24
Figure 25: Type de camera Photogrammétrique (Nikon D750).....	25
Figure 26: Vision stéréoscopique par deux yeux[20].....	27
Figure 27: Projection de photos en relief utilisant la lumière polarisée[28].....	28
Figure 28 : Alignement vertical.[27]	28
Figure 29 : Différences de dimensions.[27]	29
Figure 30 : Différences trapézoïdales.[27]	29
Figure 31 : Différences d'expositions.[27]	29
Figure 32: Exemple d'appareil stéréoscopique créé par auguste Bertsch en 1860[27].....	30
Figure 33: Appareil stéréoscopique de 75 paires[27].....	31
Figure 34: Appareil photo a quatre prise d'image[27].....	31
Figure 35: Exemple d'appareil photo numérique[27].....	32
Figure 36: Exemple d'appareil photo 3D [27].....	32
Figure 37: Exemple de caméra 3D [27].....	32
Figure 38: Exemple de recouvrement de 60% (en vert) sur deux images constitutive[29].....	33
Figure 39: Exemple de disposition des appareils pour une numérisation linéaire unique[29].....	33

Figure 40: Exemple de disposition des appareils pour une numérisation linéaire unique[29].	34
Figure 41: Positionnements de l'appareil pour la numérisation de l'angle[29].	34
Figure 42: Exemple de disposition des appareils pour la numérisation avec plusieurs passages d'une façade.[29].	35
Figure 43: Exemple de jointure entre les points par la triangulation.	36
Figure 44: MNT de la région Nord-ouest de l'Algérie.	37
Figure 45 : Modélisation d'un modèle ortho-photo plant après l'obtention d'un cliché.[21]	38
Figure 46: Le processus de reconstitution de l'objet à l'image.[20]	40
Figure 47: Le processus Photogrammétrique de l'objet au modèle.[20]	40
Figure 48: Traitement multi-image.[20].	42
Figure 49: Modèle de feuille synthétique en 3D[34].	44
Figure 50: Distribution de point de marquage sur la feuille [34].	45
Figure 51: Structure de la feuille [34].	45
Figure 52: Nervures des feuilles générées à l'aide de la courbe b-spline d'interpolation Ball (IBBSC). [34]	45
Figure 53: Maillage de surface de feuille. [34].	45
Figure 54: Visualisation des nuages de points générés par le logiciel de photogrammétrie pix4D 40 (A), 49 (B), 54 (C), 62 (D) et 69 (E) jours après l'ensemencement. (F) Le robot avec le montage de la caméra et la station totale 69 jours après l'ensemencement. [35]	46
Figure 55: Prises d'images du tronc de l'arbre à différents points de vue. [36]	47
Figure 56: Reconstitution géométrique d'un tronc d'arbre irrégulier par la photogrammétrie [36].	47
Figure 57: Exemple d'appareils photo compact numérique.[37]	48
Figure 58: Appareil photo reflex mono-objectif (d'après marchesini 1985). [20]	48
Figure 59: Stéréo et les systèmes multi caméra. [20]	49
Figure 60: Appareils photo numériques terrestres les plus courants [20].	49
Figure 61 : problème d'ombre généré par les feuilles.	50
Figure 62: Fenêtre de démarrage pour le logiciel « Photomodeler » 2020.	53
Figure 63: Objet mal encadré.	55
Figure 64: Reconstitution 3D défaillante de la plante yucca.	55
Figure 65: Les espèces végétales (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.	56
Figure 66: Organigramme des phases de la méthodologie.	57
Figure 67: Organigramme des étapes de prétraitement.	57
Figure 68: Les appareils utilisés.	58
Figure 69: Impression du canevas.	59
Figure 70: Traitement automatique sous Photomodeler.	60
Figure 71: Organigramme des étapes d'Acquisition.	61
Figure 72: Méthodologie de Prise de vue pour le palmier.	62
Figure 73: Organigramme des étapes de traitement.	63
Figure 74: La délimitation de l'objet (c) :Gasteria,(d) : Palmier.	64
Figure 75: La correspondance entre les points.	65
Figure 76: Nuage des points séparés (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.	66
Figure 77: Nuage de point densifié (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.	67
Figure 78 : Paramètre du maillage.	68
Figure 79: Résultat de maillage (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.	69
Figure 80: Résultat de Texturage (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.	70

Figure 81: Histogramme Recapulatif des résultats de reconstitution 3D.	72
Figure 82: Reconstitution du tronc de l'arbre.....	73
Figure 83: Tronc d'arbre dans la réalité.	74
Figure 84: Différence du cactus entre la réalité et la reconstitution 3D.	75
Figure 85 : Problème de l'ombre.....	75
Figure 86: Reconstitution de la plante gasteria.	76
Figure 87: Gasteria photo réelle.	76

Liste des tableaux

Tableau 1: Résultat de la reconstitution des photos	56
Tableau 2: Recapulatif des résultats de reconstitution 3D	71
Tableau 3:Recapulatif des résultats avec mise à l'échelle des valeurs.....	71

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 d'autres termes : rendre la photographie mesurable comme une carte, dont l'échelle est bien déterminée.

Depuis la mutation de la photogrammétrie analogique vers la photogrammétrie numérique, cette dernière a connu une multitude applicative dans des domaines très variés (Industrielles, Agriculture, ingénierie, 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).

Par ailleurs on retrouve une accentuation sur l'utilisation de la photogrammétrie pour les objets industriels par rapport à ceux naturels, à savoir ceux liés aux espèces végétales.

Ceci peut être expliqué par la nature géométrique complexe des plantes qui est assez difficile à modéliser.

De ce fait on se contente de prises de photos ordinaires qui ne peuvent exploiter comme document métrique ou de mesure sur les plantes cibles. La photographie a gardé son aspect bidimensionnel même avec l'utilisation des caméras multi-spectrales (Infrarouge, Infrarouge thermique, Ultra-violet, visible...), car on ne pouvait pas reconstruire une photo 3D.

Mais 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.

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 (caméra photogrammétrique), le pourcentage de chevauchement entre les

photos prise ; 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 précise sur le plan planimétrique du terrain.

Hélas, ce ne 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 a 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 soucie sur les angles de prises de vue sauf d'assurer par estimation visuelles 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 liées à cette nouvelle technologie ?
- Quelles sont les méthodes d'acquisition pour avoir un tel produit ?
- Peut-on appliqué cette technique pour la reconstitution 3D des plantes ?

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

Chapitre 1 : Concepts de base

1 Historique :

La photogrammétrie est une technique qui a vu le jour très rapidement à la suite de l'invention de la photographie au XIX e siècle.[1]

Déjà au cours des siècles précédents, différents peintres avaient étudié la perspective en utilisant des dispositifs optiques simples.[1]

L'idée était déjà de fixer sur le papier une image aussi neutre, objective et conforme à la réalité que possible et reconstituer la forme les dimensions et la position d'un objet à partir de perspectives.[1]

Par la suite, l'exploitation d'images pour mesurer les distances de différents objets ne fut qu'un simple réemploi de techniques de topographie, de type triangulation et intersection. Et comme les publications de ces techniques, dès le XVI e siècle, le montraient bien, les applications envisagées étaient d'abord de type militaire : comment ajuster le tir d'un canon, comment cartographier une place forte ennemie sans s'en approcher, etc.[1]

En 1859 que le colonel français A. Laussedat présenta à l'Académie des Sciences, une méthode de détermination de coordonnées de points basée sur un calcul d'intersection spatiale à partir d'un couple de clichés de l'objet Parallèlement.[2]

l'architecte allemand A. Meydenbauer , à qui l'on doit le terme de photogrammétrie, utilise avec succès ces techniques dans des travaux architecturaux de grande envergure.[2]

De nombreux progrès techniques et théoriques ont permis, dès le début du 20ème siècle, à cette science nouvelle d'évoluer rapidement : la stéréophotogrammétrie développée par C. Pulfrich (1901), la définition de principes pour une mise en œuvre rationnelle des restituteurs optico-mécaniques par O. von Gruber... Actuellement, le développement des moyens de calculs est tel, qu'ils permettent de traiter toujours plus de données, avec des algorithmes toujours plus complets.[2]

CHAPITRE 1 : CONCEPTS DE BASE

La photogrammétrie a également connu une évolution dont nous souhaitons ici rappeler l'historique :



Figure 1:Photogrammétrie restituteur analogique.[3]

La photogrammétrie analogique : fut utilisée pendant des décennies elle présentait des contraintes physiques (angulaires et linéaires) d'orientation relative et absolue dues aux appareillages optico-mécaniques (voir fig. n°1).[4]



Figure 2: Restituteur analytique de photogrammétrie.[3]

La photogrammétrie analytique annihile les exigences de l'analogie physique ; le modèle se fabrique numériquement, toujours à partir de photographies, leur géométrie étant le plus souvent connue (fig. n°2). Aujourd'hui, l'image numérique supplante la photographie. Le pixel tente de succéder au grain d'argent comme unité de mesure.[4]

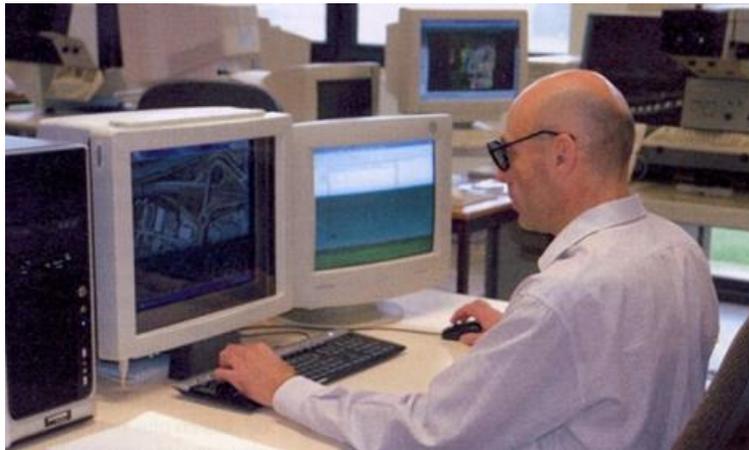


Figure 3 : Photogrammétrie numérique.[3]

La photogrammétrie numérique fonctionne suivant le principe de la corrélation d'images (Voir fig. n°3). La corrélation est la reconnaissance automatique de pixels homologues sur une surface définie.[4]

Des algorithmes d'analyse d'images se substituent à la vision humaine en associant à tout point d'une image G1 (gauche) un point homologue dans l'autre image D1 (droite). Il est toujours essentiel que les clichés présentent des qualités géométriques et photographiques analogues.[4]

Ces caractéristiques sont garanties dans le cas d'images réalisées avec des chambres métriques équipées de matrices DTC6. À ce stade, une observation virtuelle stéréoscopique va permettre la détermination de points XYZ et la création de modèles numériques de terrain, soit d'une manière manuelle en fusionnant et en saisissant des points caractéristiques de l'objet, soit de manière automatisée en corrélant les images suivant un maillage fixe programmé.[4]

2 Définition :

La photogrammétrie est la technique qui permet de reconstituer la forme, les dimensions et la position d'un objet à partir de perspectives de cet objet enregistrées photographiquement.[5]

3 Type de photogrammétrie :

On peut obtenir les prises de vues à partir d'un avion (photogrammétrie aérienne), ou de stations terrestres (photogrammétrie terrestre).

3.1 Photogrammétrie aérienne :

La photogrammétrie aérienne est née dans les années 30, dès que les géographes et topographes ont découvert l'intérêt des avions comme plateforme de prise de vue.[6]

Les prises de photos se font du ciel (par drone, avion, ...) et sous forme d'aller-retour. Ainsi, la totalité de la zone de mission est survolée. Elle est employée lorsque l'on a une surface de grande importance à lever ou quand l'accès est difficile ou dangereux pour un opérateur.

Ses applications sont nombreuses et variées : calculer des cubatures, des linéaires, de faire de la cartographie, suivi d'ouvrage d'art, explorations de zones dangereuses ou inaccessibles, industries, toitures, carrières, surfaces agricoles.[7]

Le principe est relativement simple, prendre de nombreux clichés à l'aide d'un multi-rotors, ces photographies étant classiques, plates, le but est de leur donner du relief en traitant et modifiant les images pour les amener à une échelle souhaitée par un logiciel spécifique à la modélisation 3D.[8]

Avec la photogrammétrie par drone, il est aujourd'hui possible de modéliser une zone en 3D afin de réaliser des plans, des mesures et des calculs (longueurs, surfaces, volumes). Vous pouvez donc accéder à la photogrammétrie cartographique de précision à très haute résolution.[9]



Figure 4:Exemple de photogrammétrie aérienne.[10]

Cette évolution ouvre par conséquent de nouvelles opportunités pour les secteurs de la mesure, de l'inspection technique et de la recherche (géomètres, topographes, archéologues, métier du BTP, architectes, cartographes, industriels...). Elle permet également aux opérateurs de drone de proposer un service innovant et à forte valeur ajoutée à ses clients.[9]

Le drone et la 3D

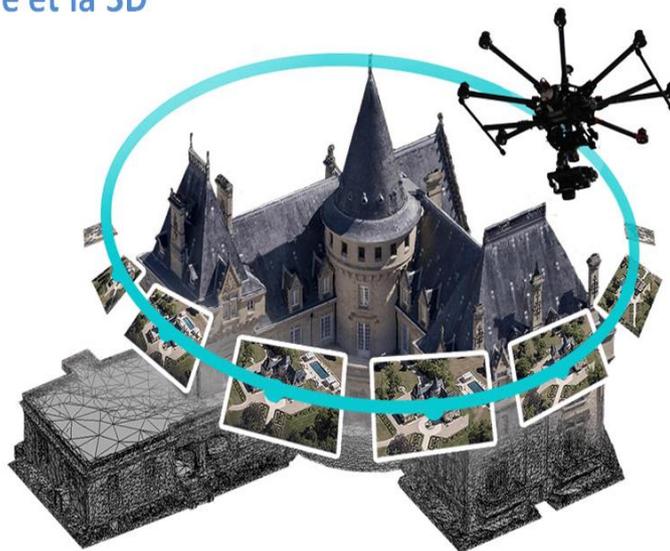


Figure 5:Photogrammétrie aérienne par drone.[11]

CHAPITRE 1 : CONCEPTS DE BASE

Un drone est un aéronef sans pilote, télécommandé ou bien programmé. Il existe une multitude de drones. La taille, la masse, l'autonomie sont autant de paramètres qui différeront selon l'application que doit réaliser un drone [12] (on cite à titre d'exemple de drone utilisé pour les opérations photographiques ordinaire et pour les opérations photogrammétriques celui de la compagnie DJI (voir figure ci-dessous).



Figure 6: DJI Phantom 4 utilisé pour les relevés Photogrammétrique. [13]

3.2 Photogrammétrie terrestre :

Est la prise de photos au sol. Tout ce qui n'est pas observable depuis le ciel (façades, intérieurs, voûtes...) a donc vocation à être traité par les méthodes terrestres d'acquisition.

La stéréoscopie s'obtient par simple déplacement du photographe ou par l'utilisation conjointe de deux caméras. Elle permet de faire un relevé, d'étudier des déformations ou analyser des pathologies. Elle peut aussi s'utiliser dans la détermination des dimensions ou volumes. Actuellement, les applications de la photogrammétrie terrestre varient beaucoup. On peut l'utiliser pour une restitution de façades, une conservation du patrimoine (statue, ornement...), un suivi de petits ouvrages d'art... Elle se présente comme un bon complément lors de missions aériennes spécifiques.[14]



Figure 7: Appareil pour les levés architecturaux par Photogrammétrie terrestre combinais avec GPS de précision et un cymomètre.[15]

4 Principe de fonctionnement de la photogrammétrie:

Ce qui est important en photogrammétrie c'est la relation géométrique entre les caractéristiques représentées dans l'image et leur emplacement dans la nature.

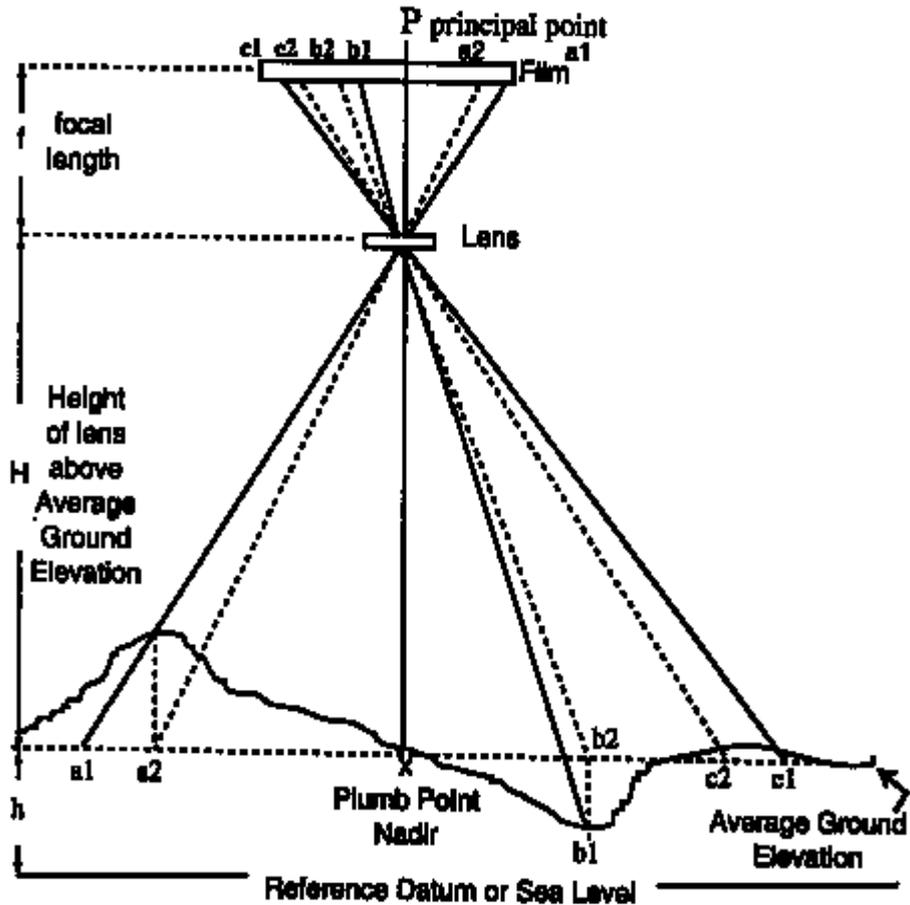


Figure 8 : Facteurs entrant dans le calcul des paramètres de la caméra.[16]

Les concepts présentés dans la figure ci-dessus sont valables pour tout type de prise de vues (aériennes ou terrestres) même si les termes employés renvoient pour beaucoup à l'aérien.[17]

On appelle hauteur de vol, la distance H entre le sommet de prise de vue et le sol.

En photogrammétrie terrestre, on parle d'éloignement à l'objet d'intérêt.

On appelle nadir l'image du pied de la verticale passant par S, centre de la perspective ou sommet de prise de vue : $c \neq n$ si l'axe optique n'est pas vertical.[17]

L'échelle moyenne e d'une photographie argentique est égale au rapport des distances sur la photographie par les distances sur le terrain.[17]

4.1 Types de projections :

- La projection conique (ou centrale) :

est la projection selon un faisceau de droites passant par un même point sur une surface. Elle est entièrement définie par la position du point et de la surface. L'appareil photographique forme une image par perspective conique : le point d'intersection des rayons lumineux est le centre optique et la surface de projection, le fond de chambre.[17]

- Les projections parallèles :

sont des projections d'un objet 3D sur un plan qui conservent les droites parallèles. C'est à dire les droites qui sont parallèles dans l'espace restent parallèles sur le plan.[18]

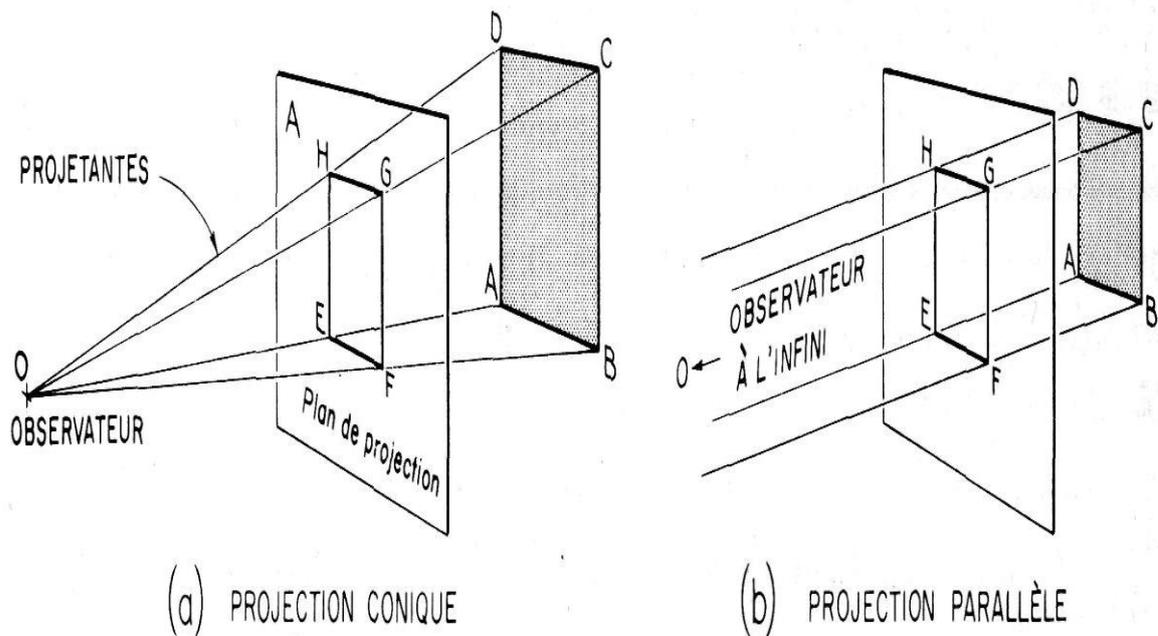


Figure 9:Les deux types de projection.[19]

5 Les paramètres internes :

Les paramètres intrinsèques d'une caméra sont les suivants :

- 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.

Le PPS est formé par l'intersection de l'axe optique avec le plan du capteur photosensible de l'appareil photographique. La distorsion en ce point est nulle.

Le PPA correspond au centre de l'image formée à travers l'objectif par un faisceau de rayons parallèles entre eux et perpendiculaires au plan du fond de chambre. Il ne s'agit pas réellement du centre de l'image car la fabrication du système optique n'est pas parfaite.

De ce fait, les axes des lentilles ne sont pas alignés. La distance séparant ce point et le centre de perspective correspond en fait à la distance focale lorsque le focus de l'appareil est positionné à l'infini.

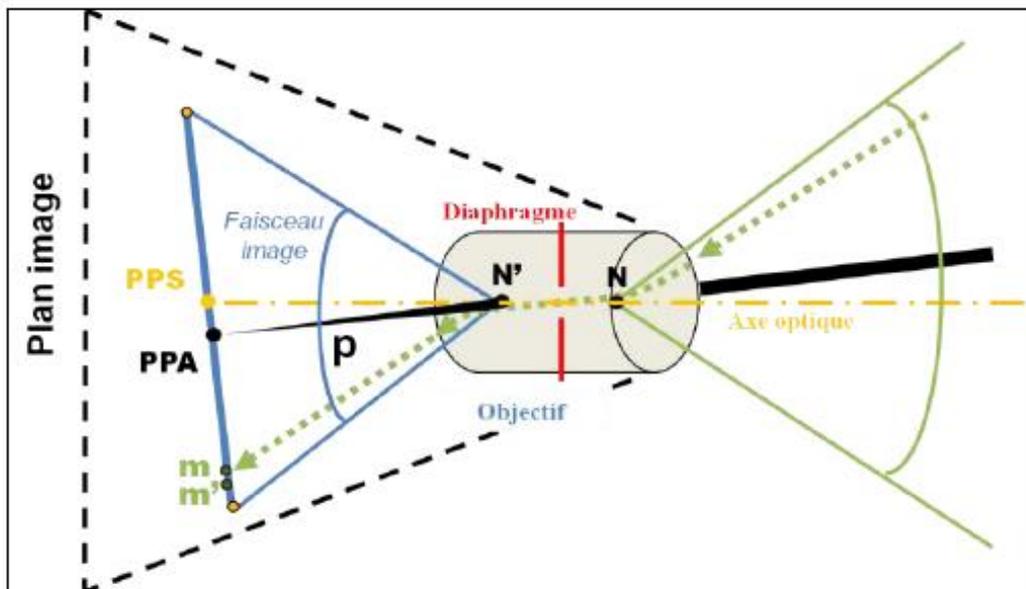


Figure 10: Géométrie des différents paramètres internes de l'appareil photographique. [20]

5.1 Les distorsions :

Les distorsions sont dues au non-parallélisme entre les rayons incidents et émergents. On peut les ranger en deux catégories : les distorsions radiales et les distorsions tangentielles. Les distorsions radiales peuvent être de type « barillet » ou « coussinet ».

Les distorsions peuvent être modélisées par un polynôme de degré impair si on se place dans le cas d'un objectif parfait ; en supposant que la distorsion radiale est symétrique par rapport au PPS. D'une manière générale, le polynôme est limité au degré 7 et ne contient ni de termes de degrés 1, ni de constantes, la distorsion étant nulle au PPS.

Le terme de premier degré est lié au choix de la distance principale. Il est souvent choisi comme nulle (distance principale au centre de l'image) ou de manière à ce que la distorsion maximale dans le champ soit la plus faible possible. Dans le cas où l'optique ne peut être considérée comme parfaite, la modélisation de la distorsion devient plus complexe car celle-ci perd son caractère radial et symétrique.

Les distorsions tangentielles sont prises en compte pour certaines applications mais sont souvent négligées. Elles visent à compenser les mauvais ajustements des lentilles par rapport à l'axe optique.



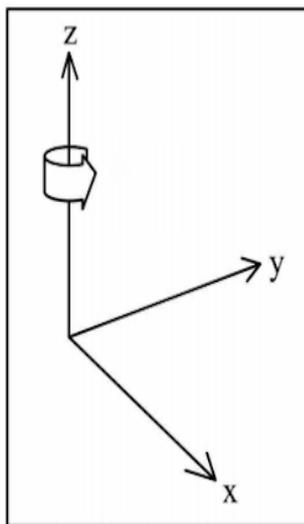
Figure 11: Effets de la distorsion radiale [21] .

5.2 Les angles Omega, Phi, Kappa :

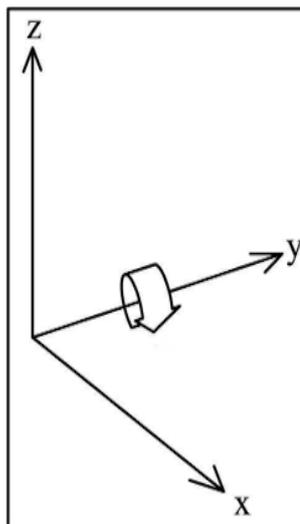
Les angles oméga, phi, kappa sont définis comme les angles utilisés pour faire pivoter un système de coordonnées géodésiques (X, Y, Z) et l'aligner avec le système de coordonnées de l'image. [22]

Les rotations sont appliquées dans l'ordre suivant :

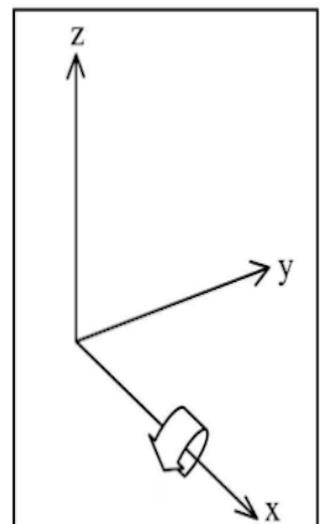
- Kappa (κ), la rotation autour de l'axe Z ;
- Phi (φ), la rotation autour de l'axe Y ;
- Omega (ω), la rotation autour de l'axe X.



Rotation around the Z-axis (Kappa)
Exterior orientation rotations/angles.



Rotation around the Y-axis (Phi)



Rotation around the X-axis (Omega)

Figure 12: Angles de rotation kappa, Phi, Omega [22].

5.3 La distance focale :

La distance focale, parfois simplement appelée focale ou longueur focale), peut être définie de manière simplifiée par la distance (exprimée en millimètres) qui sépare le centre optique de l'objectif et le foyer.

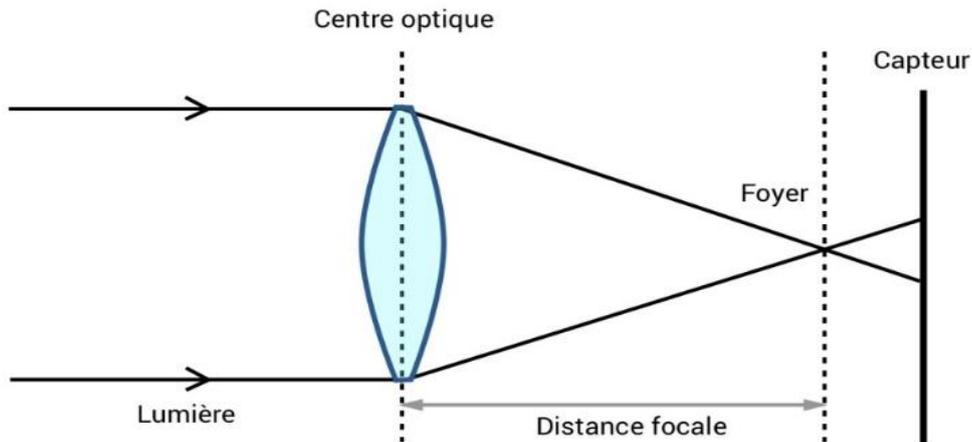


Figure 13: Distance focale.

5.4 L'angle solide :

Un angle solide est l'analogie tridimensionnelle de l'angle plan ou bidimensionnel. L'angle plan étant défini, dans l'espace bidimensionnel, comme le rapport de la longueur de l'arc sur le rayon d'un cercle, l'angle solide, dans l'espace tridimensionnel, est défini de façon analogue comme le rapport de la surface d'une partie d'une sphère sur le rayon au carré. Son unité est le stéradian noté sr. [23]

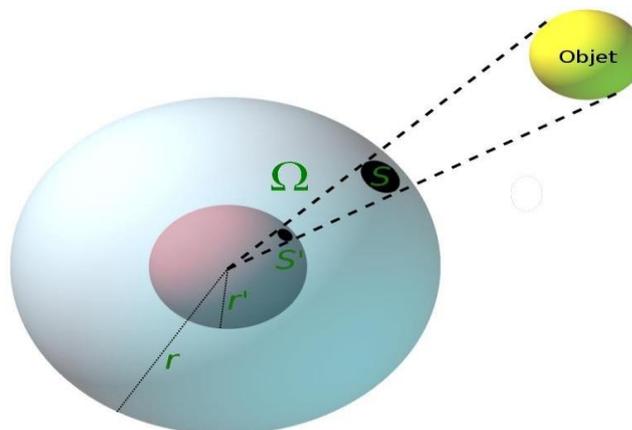


Figure 14: L'angle solide [23].

5.5 Les trois rotations de la caméra :

Rotation horizontale : Nommée panoramique ; consiste à tourner la caméra de gauche à droite ou de droite à gauche sans bouger le trépied. Alors que si en bougeant la tête rapidement nous pouvons assimiler l'information visuelle, il en n'est rien à l'écran. S'il est trop rapide, ce mouvement ne laisse pas assez de temps au téléspectateur d'assimiler l'information. C'est pour cela qu'il faut être suffisamment lent en effectuant un tel mouvement.

Rotation verticale : consiste à pointer la caméra de haut en bas ou de bas en haut sans bouger le trépied. Encore une fois, il est préférable d'effectuer ce mouvement lentement pour que le cerveau humain puisse assimiler l'information.

Rotation autour de l'axe optique : C'est la rotation autour du troisième axe restant.

5.6 Les paramètres de configuration :

La sensibilité ISO25 : (25 ISO : Acronyme de International Organisation for Standardisation.) :

La sensibilité ISO traduit la capacité d'un capteur photosensible à réagir à la lumière, Plus elle est élevée, plus l'appareil est sensible à la lumière et donc plus la quantité de lumière nécessaire pour la prise de vue est petite.

Il faut veiller à bien la régler car elle influe sur la qualité de la photographie. Plus elle est élevée, plus l'image présentera un aspect granuleux (bruit), plus elle est basse, plus l'image est fine.

La sensibilité ISO influe donc directement sur la qualité du nuage de points qui sera généré. En effet, en présence de bruit la détection des points d'intérêts et les calculs de corrélation seront plus délicats. Le choix d'une sensibilité ISO basse implique des temps de pose relativement longs (de l'ordre d'une demi-seconde) pour qu'il y ait suffisamment de lumière arrivant au capteur.

5.7 L'ouverture :

L'ouverture de l'objectif est réglée par un dispositif mécanique appelé diaphragme. Celui-ci est centré sur l'axe optique et est situé entre les groupes de lentilles antérieures et postérieures de l'objectif. Plus l'ouverture du diaphragme est grande, plus la quantité de lumière arrivant au capteur est grande et donc les photographies lumineuses. En revanche, plus cette ouverture est grande, plus la profondeur de champ de l'image est petite.



Figure 15: Effet de l'ouverture sur la qualité de la photo [20].

6 Les paramètres externes [20] :

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

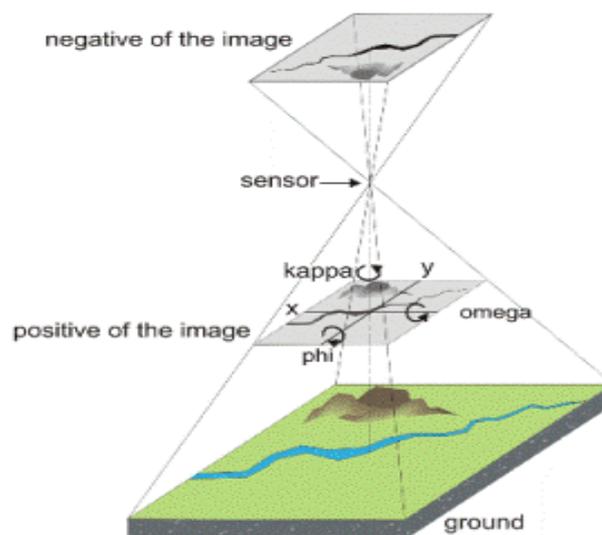


Figure 16: Les paramètres externes de la caméra.[24]

7 Problèmes liés à la photo :

7.1 La perspective :

La perspective se réfère à la relation entre les objets dans une photographie. Cela comprend leurs positions relatives et les tailles et l'espace entre eux. La perspective dans une image montre est la façon dont les objets tridimensionnels sont représentés à deux dimensions.[25]

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 il est influencé par 3 facteurs : la longueur focale, la distance de prise de vue et l'angle de prise de vue.[20]



Figure 17: Exemple d'image en perspective.

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.

7.2 L'absence de l'échelle :

Une photo est une représentation en 2 dimensions d'une réalité en 3 dimensions, observée avec un effet 3D. Le sujet photographié peut être beaucoup plus petit sur la photo. Comme par exemple un tirage au format 10×15 cm de l'Everest. Mais le sujet peut aussi être beaucoup plus petit dans la réalité comme en photo macro et microscopique.[26]

En résumé, la représentation photographique d'un objet n'a la plupart du temps que peu de rapport avec sa taille réelle.[26]



Figure 18: Exemple d'absence de l'échelle sur la photo.

8 Le calibrage de l'appareil :

Le but du calibrage de la caméra est de déterminer le modèle géométrique de la caméra décrit par les paramètres d'orientation intérieure [21] :

- Localisation spatiale du centre de perspective dans le système de coordonnées image ;
- Distance principale et coordonnées image du point principal ;
- Paramètres décrivant les erreurs d'image : distorsion et corrections du capteur.

En autre terme, le calibrage consiste à l'extraction et la quantification des erreurs de la distorsion de la caméra utilisée. Ces erreurs se traduisent par le déplacement longitudinal et transversal et radial de chaque pixel de la photo de sa vraie position par rapport à la scène photographiée.

Notons que la déformation résultante de la distorsion peut être remarquable visuellement sur certaines photographies ou non malgré son existence dans toutes les photographies.

Trois méthodes de calibrage peuvent effectivement être distinguées. Celles-ci sont caractérisées par l'objet de référence utilisé et par l'heure et le lieu du calibrage.

- Calibrage en laboratoire ;
- Calibrage du champ d'essai ;
- Auto-calibrage.

Pour pallier ce problème qui gêne non seulement l'aspect visuel mais présente un obstacle majeur pour le principe essentiel de la photogrammétrie, à savoir les mesures géométriques sur l'image. Il nous faut tout un mode opératoire appelé calibrage avant commencer les prises de photographie.

Il s'agit donc de la préparation d'une scène appelée canevas qui va servir comme référence géométrique pour l'opération.

En effet, le canevas n'est rien que du papier imprimé contenant une grille de points (100 points comme indiqué dans la figure ci-dessous, obligatoirement équidistant).

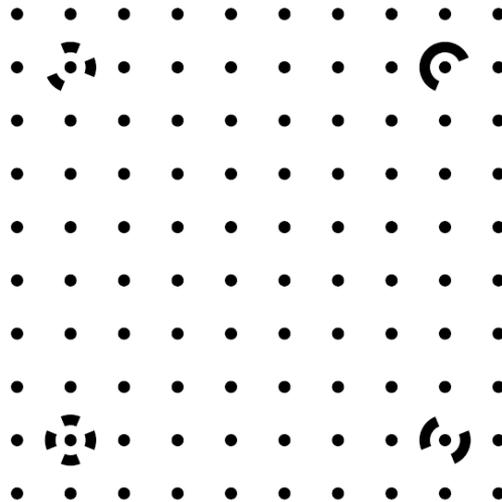


Figure 19: Grille de calibrage Photomodeler [20].

Ce canevas contient aussi de point d marquage avec symbolisation différente. Pratiquement on doit photographier le canevas depuis ces quatre coté.

De chaque côté on va prendre 03 photos selon les orientations de la caméra, à savoir camera en position ordinaire, en 90° vert le côté gauche et en fin en 90° vers le côté droit. En totale, on va prendre 12 photos sur le canevas.

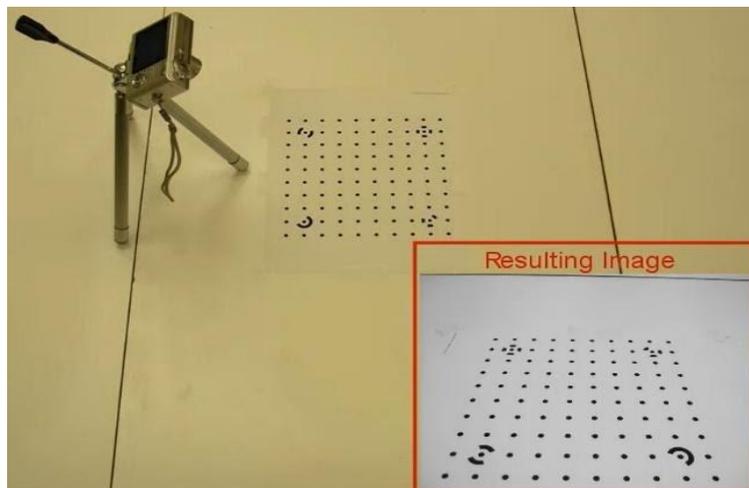


Figure 20: Première capture à 90° [20].

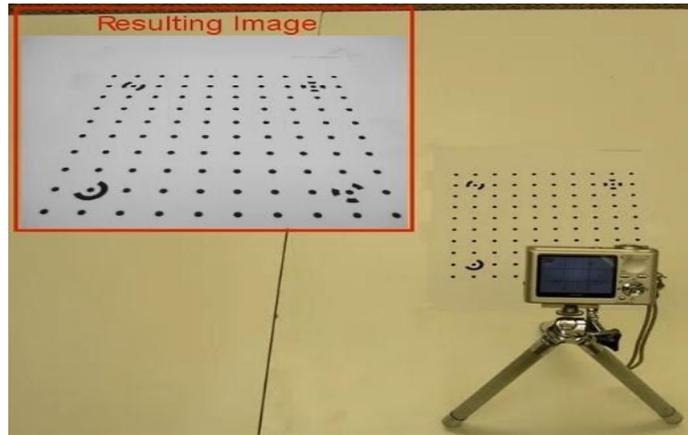


Figure 21: Deuxième capture à 0° [20].

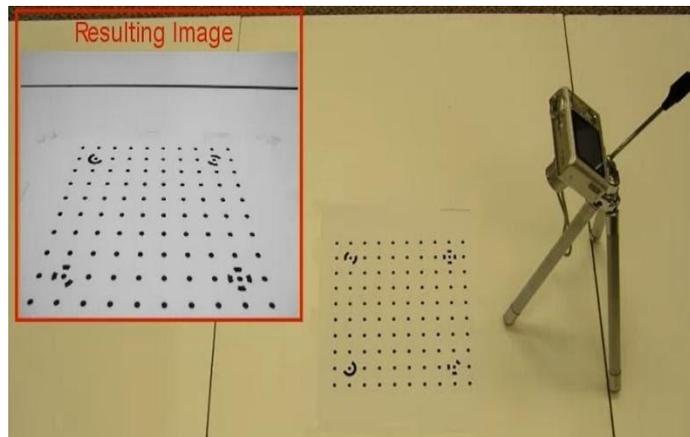


Figure 22: Troisième capture à -90° [20].

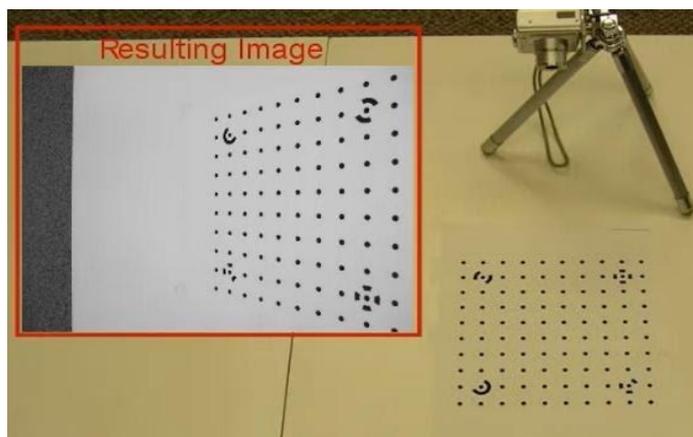


Figure 23: Quatrième capture à 180° [20].

CHAPITRE 1 : CONCEPTS DE BASE

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 différence de symbole des points de marquage, va aider le programme à détecter facilement les positions de camera selon les coté et selon son orientation.

Le logiciel calcule les déplacement transversale, longitudinale et radiale pour chaque point puis génère un rapport de calibrage spécialement pour le type de camera utilisée.

Ce fichier va servir comme support de calcul pour chaque opération effectuée par la cameras calibrer. C.à.d. que nous ne sommes pas obligées de calibrer notre camera avant chaque opération de photogrammétrie. Le logiciel met la relation entre les photos et les paramètres de calibrage enregistré par le biais des métadonnées des images insérer car elles contiennent forcément dans leurs propriétés les type de cameras utilisées. Voir figure ci-après.

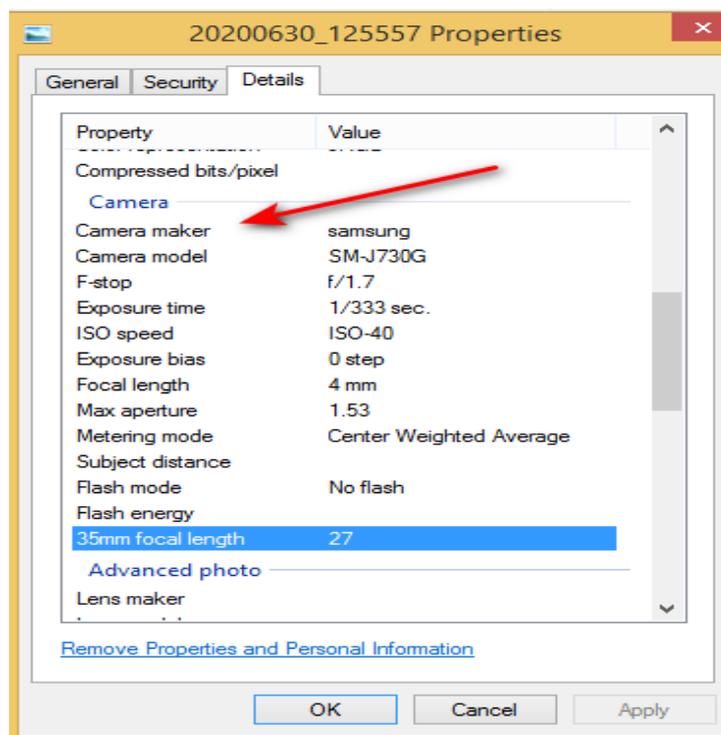


Figure 24: Le type de camera dans les métadonnées d'une image photographié dans l'onglet des propriétés de la photo.

CHAPITRE 1 : CONCEPTS DE BASE

Certains logiciels Photogrammétrique peuvent détecter les paramètres de calibrage par une Connexion aux serveurs dont on retrouve une base de données de certains types de cameras déjà calibrées.

La taille du canevas est relative à la taille de la scène envisagée à photographier. En autre terme un canevas de taille A4 est largement suffisant pour photogrammètrie des objets de taille centimétrique ou un peu plus grand d'une feuille A4.

Autrement dit ; plus les objets sont grands ; on est obligé à ressortir les paramètres de calibrage qui sont adéquats à sa taille. Ce qui présente une tâche fastidieuse et met en valeur l'utilisation des caméras spécifiques appelées caméras photogrammétriques.

Les caméras photogrammétriques sont des caméras dont les paramètres de calibrages sont connus et fournis par le constructeur. Il demeure malheureusement coûteuse vu leur utilisation spécifique.

L'une des choses remarquables dans ce type de caméras et qu'elles comportent une grille de croix gravée sur leurs dispositifs oculaires, ces croix seront visibles dans toutes les photos prises bien entendu.



Figure 25: Type de camera Photogrammétrique (Nikon D750).

Chapitre 2 : La vision 3D

1.Principe de la stéréoscopie :

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[20].

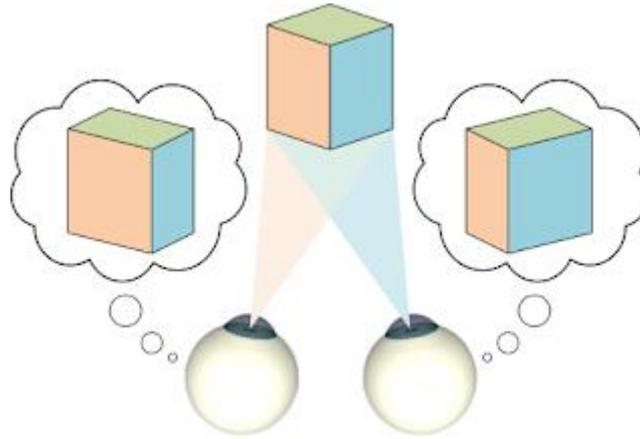


Figure 26: Vision stéréoscopique par deux yeux[20].

La projection de photos en relief utilise la lumière polarisée. La lumière envoyée par le projecteur traverse un filtre polarisant. Celui-ci oriente la lumière dans une direction bien précise.

Des filtres polarisants décalés de 90° l'un par rapport à l'autre, sont installés devant les projecteurs et le public regarde à travers des lunettes portant les mêmes filtres. Ainsi chaque œil voit l'image qu'il doit voir. Il faut utiliser un écran métallisé qui garde la polarisation de la lumière sinon l'effet de relief disparaît.[27]

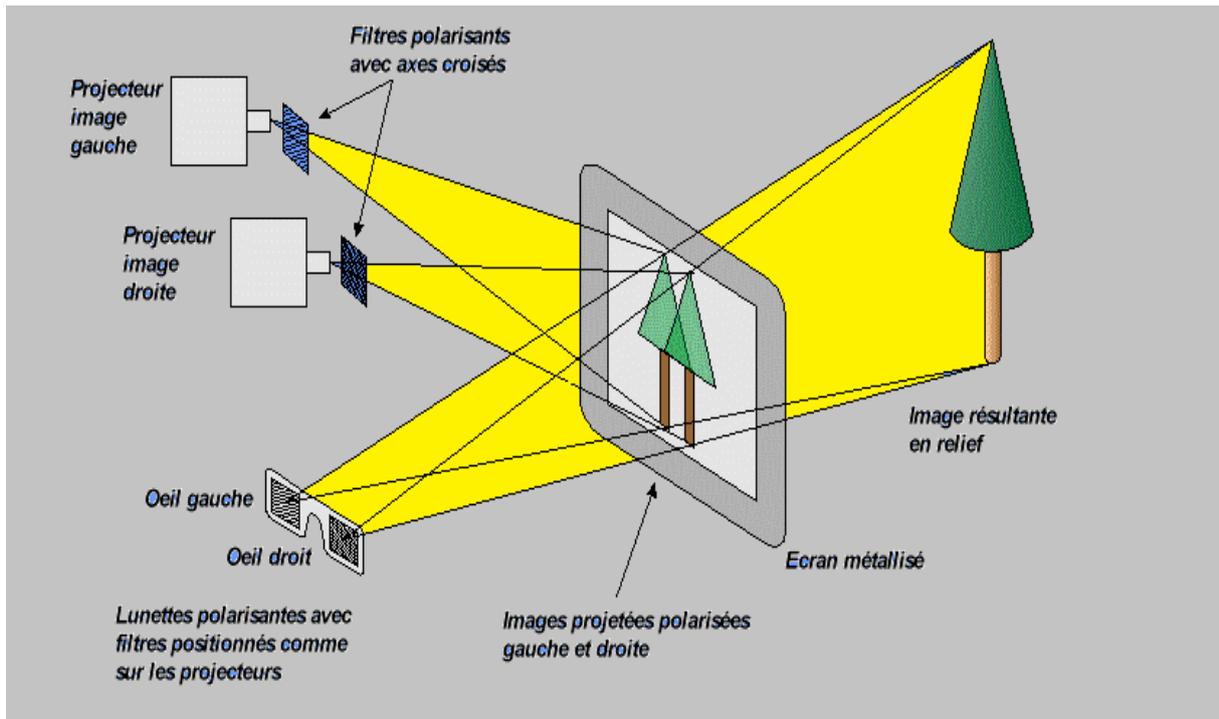


Figure 27: Projection de photos en relief utilisant la lumière polarisée[28].

1.1 Montage des images[27] :

Il faut bien monter les images afin d'avoir une bonne reconstitution 3D et parmi c'est montage en a :

Alignement vertical :

Il faut impérativement qu'il soit au même niveau et droit sur les images gauche et droite :

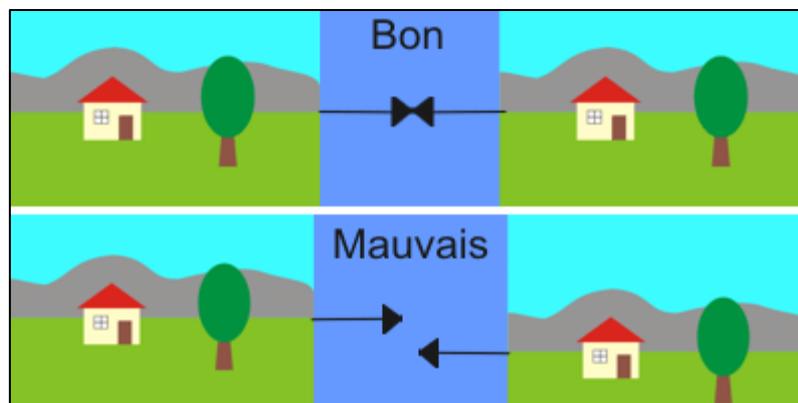


Figure 28 : Alignement vertical.[27]

Différences de dimensions :

Ce défaut peut être dû à une focale différente entre deux appareils ou deux prises de vues, ou à une distance différente « appareil/sujet photographié » lors d'une prise de vue en deux temps :



Figure 29 : Différences de dimensions.[27]

Différences trapézoïdales :

Ce défaut peut être dû à un déplacement entre l'appareil et le sujet photographié lors d'une prise de vue en deux temps :



Figure 30 : Différences trapézoïdales.[27]

Différences d'expositions :

Il ne doit pas y avoir de différences d'expositions entre les images gauche et droite :



Figure 31 : Différences d'expositions.[27]

1.2 Les Appareils Photos Stéréoscopiques :

Les appareils stéréoscopiques ont connu un développement successif au fil au fil du temps et parmi ces appareils en site :

L'appareil construit par J.-B. Danser : pour obtenir des vues en relief, il se sert d'une chambre ordinaire montée sur une planchette. Les deux photographies sont prises successivement, l'une sur la droite, l'autre sur la gauche de la planchette[27].

En 1860, Auguste Bertsch ajoute un obturateur à volets rotatifs couplés commandé par une bielle.

Ces appareils utilisent des plaques de formats 8 x 17 cm, 9 x 18 cm, 6 x 13 cm puis 45 x 107 mm Ils suivent l'évolution des appareils photos "monoculaires": la netteté se règle par un soufflet, la vitesse d'obturation est de plus en plus rapide, les diaphragmes deviennent réglables, certains sont équipés d'un niveau à bulle et d'autres ont un viseur Reflex.[27]



Figure 32: Exemple d'appareil stéréoscopique créé par Auguste Bertsch en 1860[27].

En 1938, un nouvel appareil permet de faire 75 paires stéréoscopiques 11 x 12 mm sur film 35 MM. Il s'agit du View-Master. Il faut s'équiper d'une découpeuse appropriée car les photos ont une forme spéciale pour pouvoir se fixer dans des disques en carton. Chacun d'eux pouvant contenir sept couples stéréoscopiques[27].



Figure 33: Appareil stéréoscopique de 75 paires[27].

Vers 1980, Nimslo sort un appareil qui prend quatre photos en même temps au format 18 x 22 MM. Ces images sont traitées dans des laboratoires spécialisés qui les découpent en lamelles verticales, qui fixent ces dernières dans un ordre précis et qui collent ensuite un réseau lenticulaire sur cette nouvelle photo. Ces lentilles permettent de restituer le relief sans avoir besoin d'autres accessoires. Le peu de laboratoires équipés a vite fait chuter l'intérêt de ce procédé. Seuls des professionnels l'utilisent encore à titre publicitaire[27].



Figure 34: Appareil photo a quatre prise d'image[27].

En 2000, la photo numérique a fait son apparition et permet aussi de faire de la stéréoscopie. Certains « bricoleurs » fixent deux appareils numériques sur une barrette. Ceux-ci doivent être munis d'un système de synchronisation pour les déclencher en même temps[27].



Figure 35: Exemple d'appareil photo numérique[27].

En automne 2009, Fuji sort le premier appareil numérique 3D. Il est muni de deux objectifs séparés de 77mm et a un afficheur à barrières de parallaxes qui permet de voir directement la photo prise en relief et sans lunettes. Il s'agit du FinePix REAL 3D W1 :



Figure 36: Exemple d'appareil photo 3D [27].

D'autres marques sortent des appareils numériques ou des caméras 3D, mais l'écartement entre les objectifs est souvent trop serré (30 à 40mm au lieu des 65mm de moyenne pour nos yeux). Ces appareils sont destinés à des prises de vues où les sujets ne sont pas trop éloignés : portrait ou petit groupe de personnes par exemple :



Figure 37: Exemple de caméra 3D [27].

1.3 L'angle de prise de vue :

L'angle de prise de vue et caractérisés par :

1.3.1 Recouvrement :

Afin d'avoir une qualité et une précision suffisantes, nous chercherons à obtenir un taux de recouvrement minimum d'une image sur l'autre de 60 %.[29]

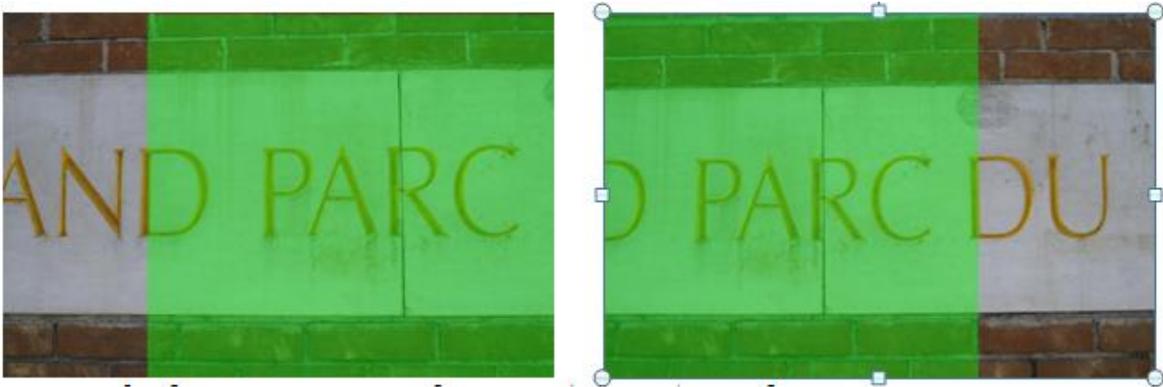


Figure 38: Exemple de recouvrement de 60% (en vert) sur deux images constitutive[29].

1.3.2 Parcours linéaire direct :

On réalise les images en ligne pour être sûr de bien recouvrir l'image précédente. Ici, chaque pyramide représente l'emplacement de l'appareil photo au moment de l'acquisition.[29]

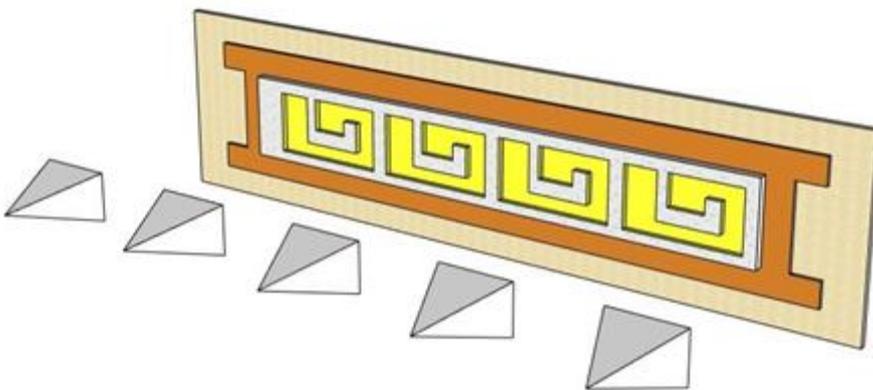


Figure 39: Exemple de disposition des appareils pour une numérisation linéaire unique[29]..

Il faudra être particulièrement vigilant à ce que les bords de l'objet soient présents sur plusieurs images pour ne pas recouvrir que les éléments centraux. Pour cela, on réalisera des images au-delà de l'objet désiré pour avoir un recouvrement dans les angles et sur les bords de

CHAPITRE 2 : LA VISION 3D

l'objet. Il faut garder en mémoire qu'un même point de l'objet doit être visible au strict minimum sur 2 images afin de pouvoir être reconstitué.[29]

Si la surface à numériser présente un angle, comme un angle de mur, il faudra amorcer un mouvement autour de l'angle pour relier les deux surfaces, comme présentée dans le schéma ci-dessous. Ce mouvement devra toujours respecter un recouvrement minimum de 75 %, et compter en règle générale au minimum 6 photographies sur un angle.[29]

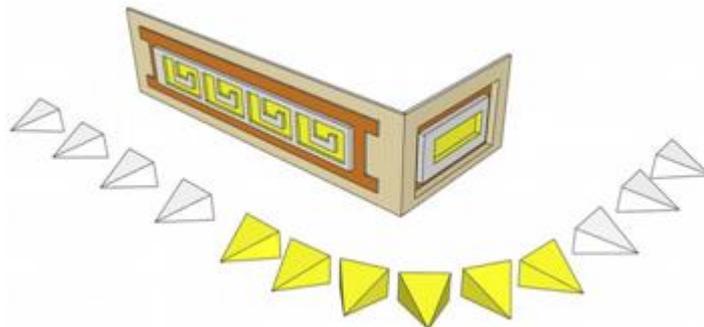


Figure 40: Exemple de disposition des appareils pour une numérisation linéaire unique[29].

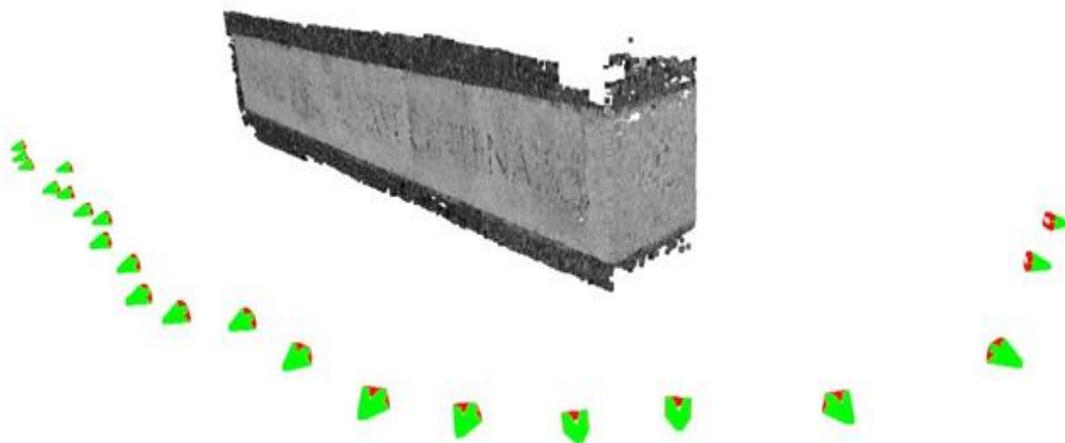


Figure 41: Positionnements de l'appareil pour la numérisation de l'angle[29].

1.3.3 Parcours linéaire multiple :

Selon le cadrage choisi, si l'objet n'a pu être entièrement numérisé en un passage, on continue le parcours linéaire en passant à la ligne suivante, toujours en respectant le recouvrement minimum de 60 %.[29]

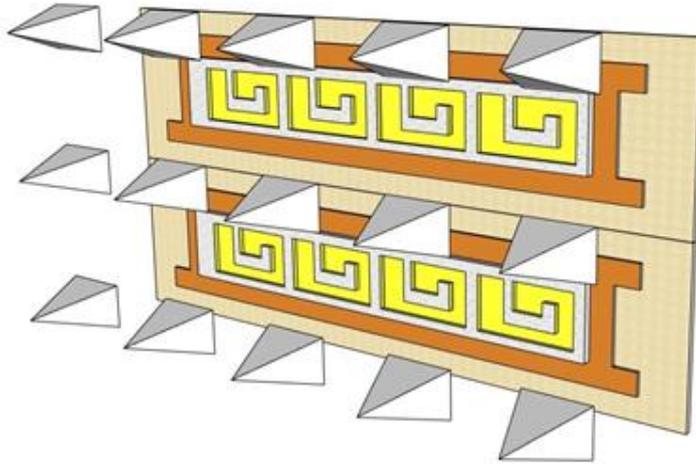


Figure 42: Exemple de disposition des appareils pour la numérisation avec plusieurs passages d'une façade.[29]

En fin Le principe de la stéréoscopie est donc le suivant : simuler la profondeur sur une surface Plane en exploitant la stéréopsie. En pratique, il s'agit de saisir une scène à partir de points de vue légèrement décalés et de présenter ces images à chaque œil de manière distincte.

On utilise donc généralement deux caméras couplées pour filmer la scène, et on utilise un dispositif de projection capable d'afficher une image à chaque œil séparément[29].

2.La reconstitution par triangulation :

Dans la pratique, la photogrammétrie s'effectue généralement avec plus de deux photographies ce qui permet d'augmenter la précision de la triangulation de chaque point de l'objet photographié .La triangulation de chacun des points permet alors d'obtenir un nuage de points 3D.[30]

Le pointage de marqueurs dont les coordonnées sont connues permet ensuite d'interpoler un MNT c'est-à-dire une image 2D où l'information du pixel n'est plus une information colorimétrique mais une information d'altitude.[30]

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 fondamental de toute reconstruction 3D à partir d'images.[20]

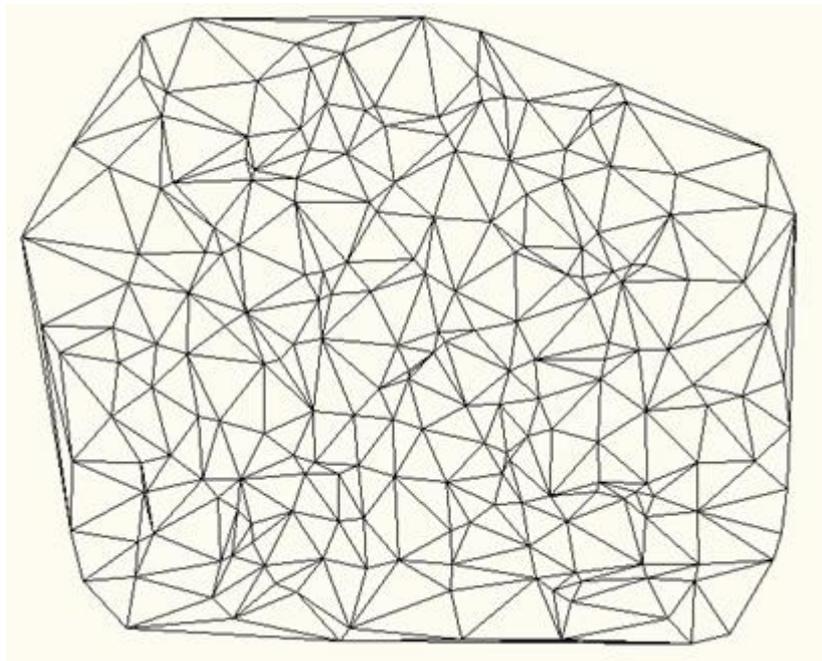


Figure 43: Exemple de jointure entre les points par la triangulation.

3.Modèle numérique de terrain et de surface:

Définition :

Un modèle numérique de terrain (M.N.T.) est l'expression de la cote z en tout point d'une surface donnée à partir d'observations choisies d'une même interpolation selon une certaine précision tolérée. C'est en fait une représentation statistique de la surface du terrain, supposée continue, par un grand nombre de points sélectionnés dont les coordonnées (x, y, z) sont connues dans un système arbitraire de coordonnées. En d'autres termes, le M.N.T. consiste en la réunion de deux éléments. Une série de points approchant au mieux la surface terrestre.

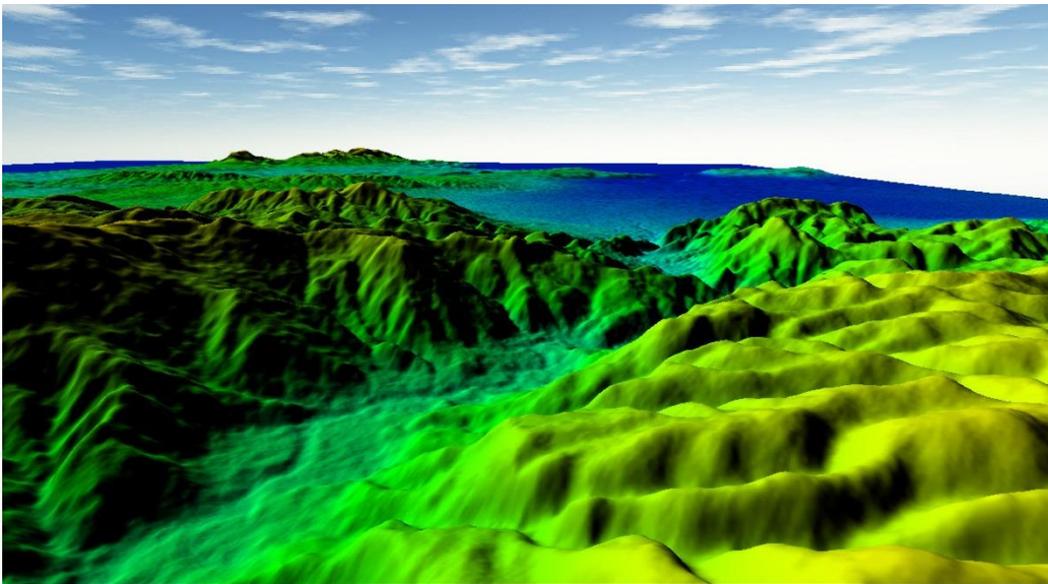


Figure 44: MNT de la région Nord-ouest de l'Algérie.

Le modèle numérique de surface 'MNS' à la même définition d'un MNT sauf qu'il est appliqué à n'importe quelle surface acquise.

L'élaboration d'un MNS ou d'un MNT s'effectue par le biais de plusieurs méthodes telles que[31] :

- ✓ Maillage carré/rectangulaire ;
- ✓ Maillage hexagonal ;
- ✓ Maillage triangulaire regular ;
- ✓ maxillae triangularine quelconque.

En fonction du type de maillage, la représentation informatique du MNT varie. Dans le cas de maillages rectangulaires, on peut utiliser des tableaux, mais dans les autres cas, les structures de données sont plus complexes[31].

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.

4. Les ortho photographies ou ortho images :

On appelle ortho photographie ou plus communément ortho photo une image obtenue par traitement d'un cliché aérien numérique ou argentique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond[32].

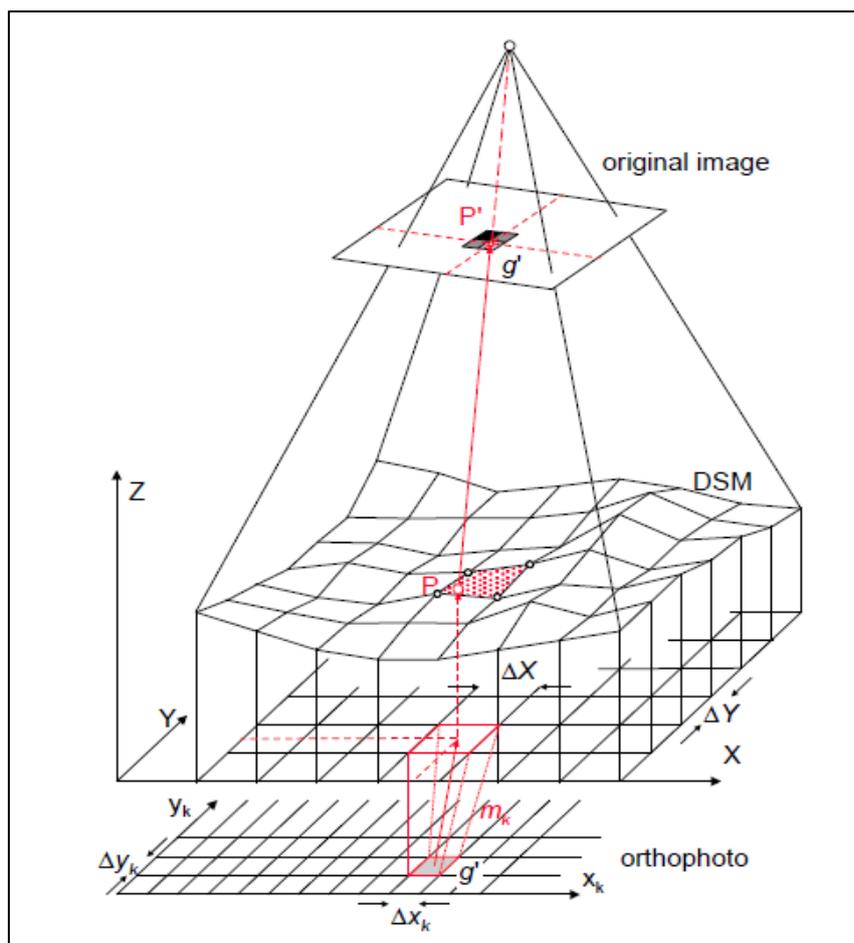


Figure 45 : Modélisation d'un modèle ortho-photo plant après l'obtention d'un cliché.[21]

4.1 Usages des ortho photographies :

Les ortho photographies sont utilisées dans des domaines variés et pour de nombreuses applications. Elles permettent l'identification d'objets, et la mesure planimétrique.[32]

Et parmi c'est domaine en site :

- ✓ L'aménagement du territoire ;
- ✓ L'urbanisme ;
- ✓ L'environnement ;
- ✓ L'agriculture et la communication.

5.Etape de traitement de reconstitution 3D :

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 Photogrammétrique peuvent être appliquées dans toute situation où l'objet à mesurer peut-être enregistrer 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.[20]

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[20].

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

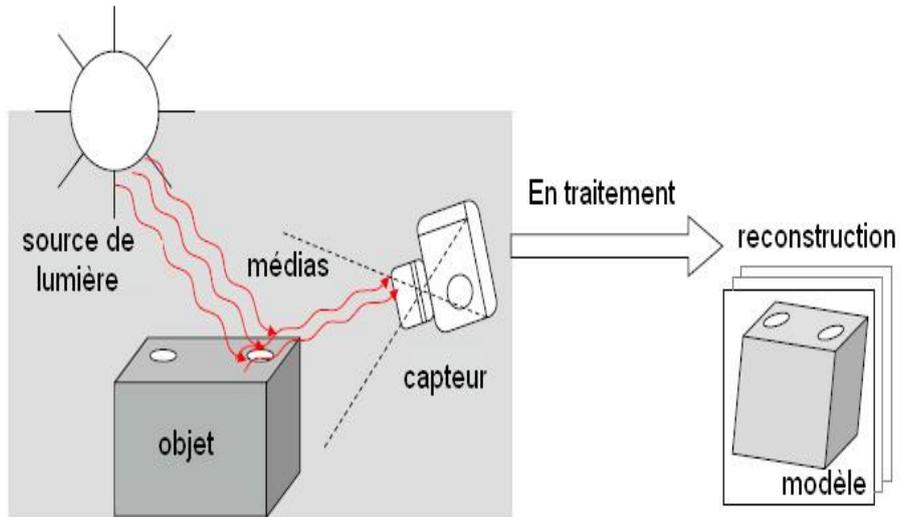


Figure 46: Le processus de reconstitution de l'objet à l'image.[20]

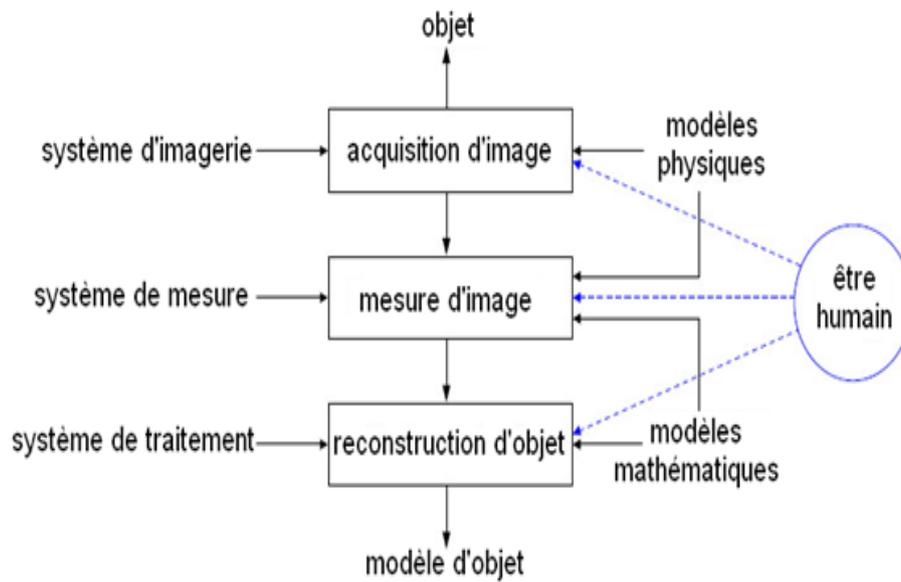


Figure 47: Le processus Photogrammétrique de l'objet au modèle.[20]

5.1. Traitement d'image unique :

Les procédures Photogrammétrique 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.[20]

Le traitement se fait en deux étapes :

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

5.2. 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[20] :

- 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, les lignes épi polaires sont parallèles et les informations de profondeur peuvent être déterminées en mesurant la x-parallaxe p_x ' en deux méthodes.[20]

- Détermination des points à l'aide des coordonnées d'image ;
- Détermination du point avec marque flottante.

5.3. 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.[20]

Les méthodes de traitement multi-image sont :

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

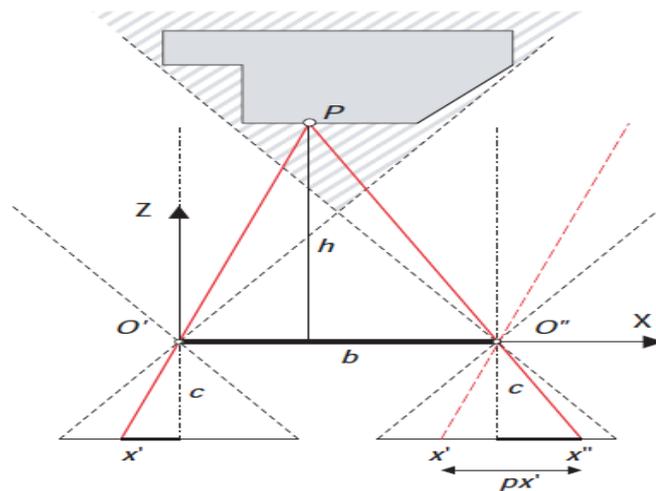


Figure 48: Traitement multi-image.[20]

*Chapitre 3 : Etat de l'art de la
photogrammétrie terrestre*

1. Applications actuelles de la photogrammétrie :

Les façons dont la photogrammétrie prend vie peut varier considérablement selon la méthode de collecte, les données recueillies, l'utilisation dans l'industrie et les technologies compatibles.[33]

Certains des produits issus du processus comprennent des ortho mosaïques, des modèles numériques de surface et des modèles numériques de terrain. Une ortho mosaïque est essentiellement une vue à vol d'oiseau d'un terrain qui s'adapte à la distorsion et peut couvrir de vastes paysages. Les modèles numériques de surface et les modèles numériques de terrain représentent les niveaux de surface et l'altitude. Les modèles de surface incluent des bâtiments et des arbres, tandis que le modèle de terrain se débarrasse de toutes ces caractéristiques, montrant la hauteur de la terre nue.[33]

L'utilisation la plus courante de la photogrammétrie est la création de cartes à partir de photos aériennes. Il est rentable et précis, permettant aux entités de planification comme les architectes, les gouvernements locaux et les ouvriers du bâtiment de prendre des décisions claires et éclairées sur leurs projets sans passer des mois à parcourir le paysage. Il est également très détaillé et peut fournir un niveau d'information exceptionnel sur une zone.[33]

La photogrammétrie fait sa marque dans de nombreux domaines, et parmi ces domaines on a :

2. Dans le domaine végétal :

L'utilisation de la photogrammétrie dans le domaine végétale est diversifiée et par mis ses applications on cite :

La modélisation géométrique des feuilles des plantes [34] :

Avec la technique de la photogrammétrie on peut modéliser la structure géométrique des nervures principale et secondaire comme indiqué dans la photo on peut ainsi mesurer avec exactitude les surfaces et les longueurs 2D et 3D à l'intérieur de la feuille de chaque zone ou de chaque nervure.



Figure 49: Modèle de feuille synthétique en 3D[34].

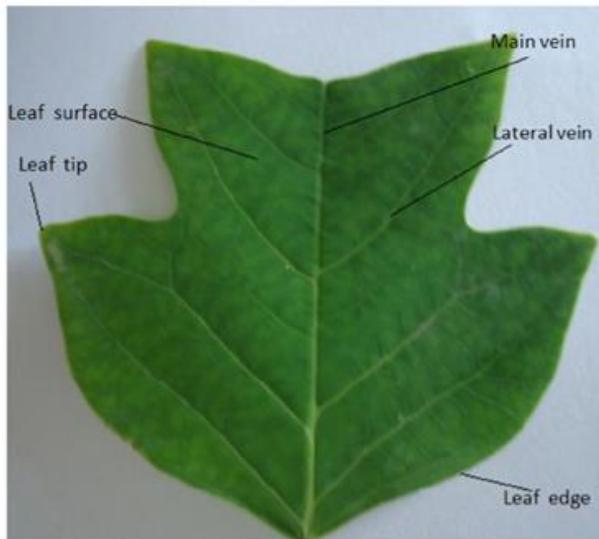


Figure 51: Structure de la feuille [34].

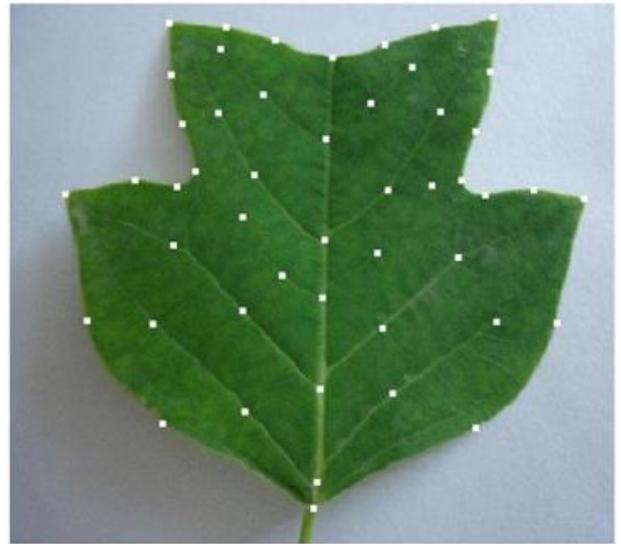


Figure 50: Distribution de point de marquage sur la feuille [34].

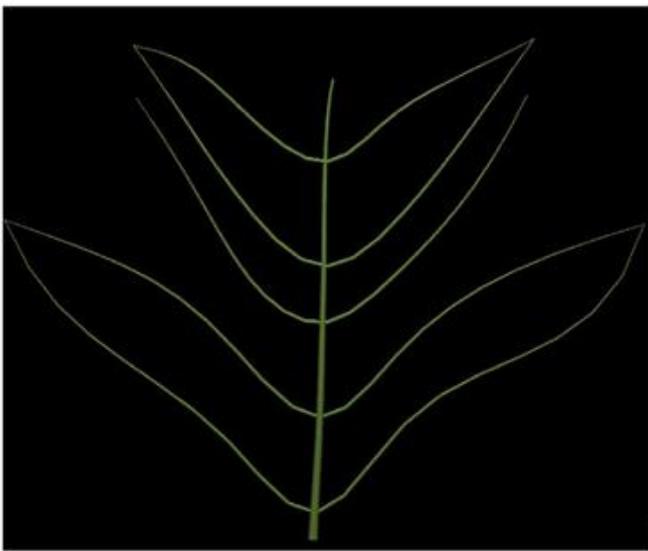


Figure 52: Nervures des feuilles générées à l'aide de la courbe b-spline d'interpolation Ball (IBBSC). [34]

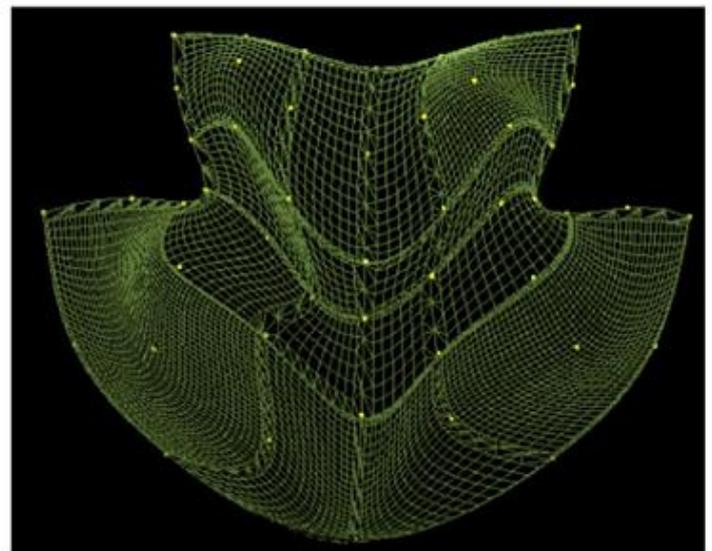


Figure 53: Maillage de surface de feuille. [34]

Pour l'estimation de la surface foliaire à différents stades de croissance des plantes [35] :
Exemple de maïs :

Un robot mobile a été utilisé pour acquérir des données de caméra à partir de rangées de maïs pour cinq stades de croissance différents. Ces données ont été utilisées pour générer des nuages de points 3D et pour estimer la surface foliaire pour tous les stades de croissance. Un filtre de distance convenait pour détecter une forte corrélation entre la surface foliaire et le nombre de nuages de points. Lors de l'utilisation d'une hypothèse de la surface foliaire réel, une fonction exponentielle polynomiale pourrait être utilisée pour minimiser l'erreur de 46% à 32% et l'écart type de 26% à 24% pour tous les stades de croissance.[35]

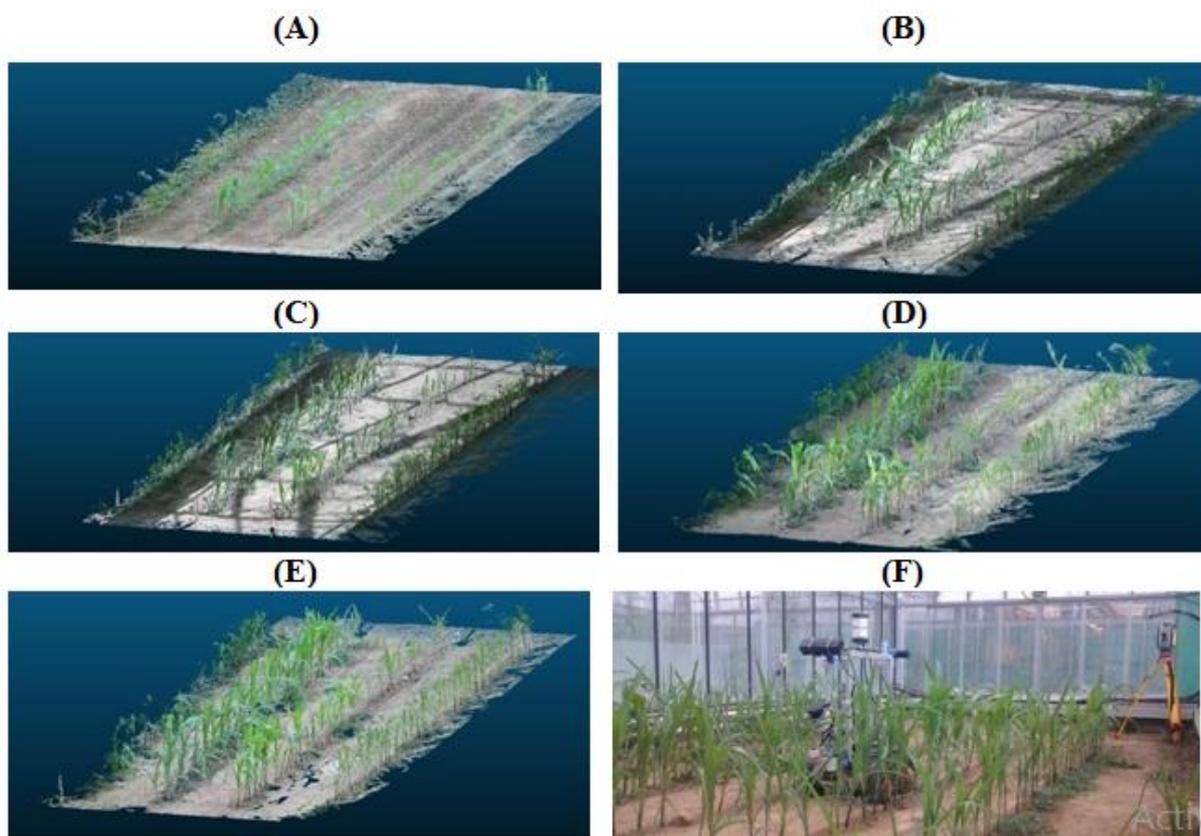


Figure 54: Visualisation des nuages de points générés par le logiciel de photogrammétrie pix4D 40 (A), 49 (B), 54 (C), 62 (D) et 69 (E) jours après l'ensemencement. (F) Le robot avec le montage de la caméra et la station totale 69 jours après l'ensemencement. [35]

Pour mesure géométrique sur les arbres à troncs irréguliers [36] :

Acquisition des données :

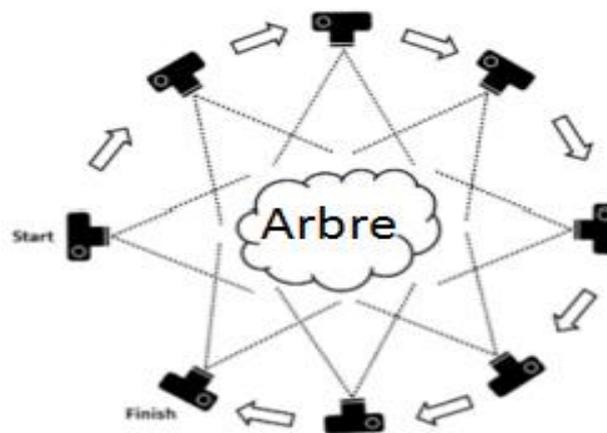


Figure 55: Prises d'images du tronc de l'arbre à différents points de vue. [36]

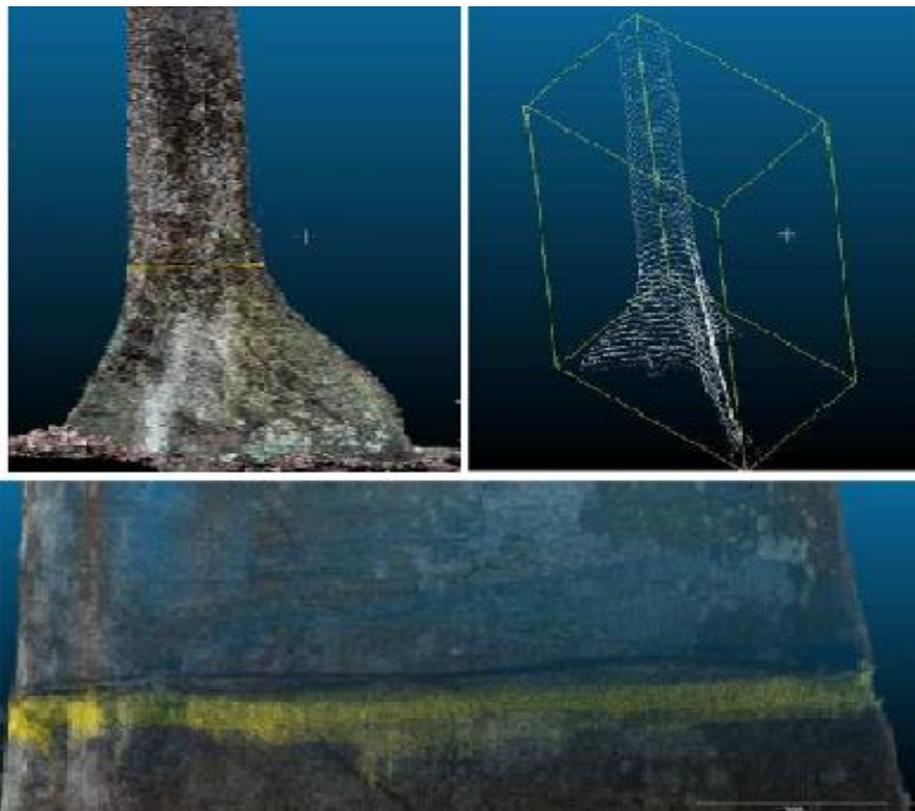


Figure 56: Reconstitution géométrique d'un tronc d'arbre irrégulier par la photogrammétrie [36].

3. Type d'appareils photographique :

Il existe plusieurs types d'appareil photographique qui diffèrent selon des paramètres internes et externes et parmi eux en site :

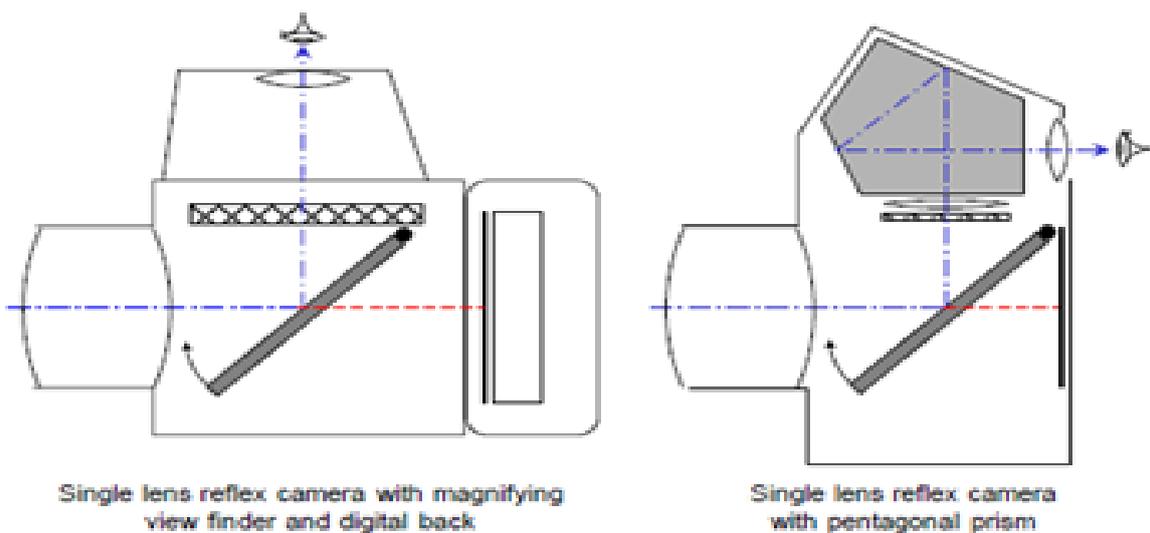


Sony Alpha 6600 Noir



Sony Alpha 7 III

Figure 57: Exemple d'appareils photo compact numérique.[37]



Single lens reflex camera with magnifying view finder and digital back

Single lens reflex camera with pentagonal prism

Figure 58: Appareil photo reflex mono-objectif (d'après marchesini 1985). [20]

CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART DE LA PHOTOGRAMMETRIE TERRESTRE

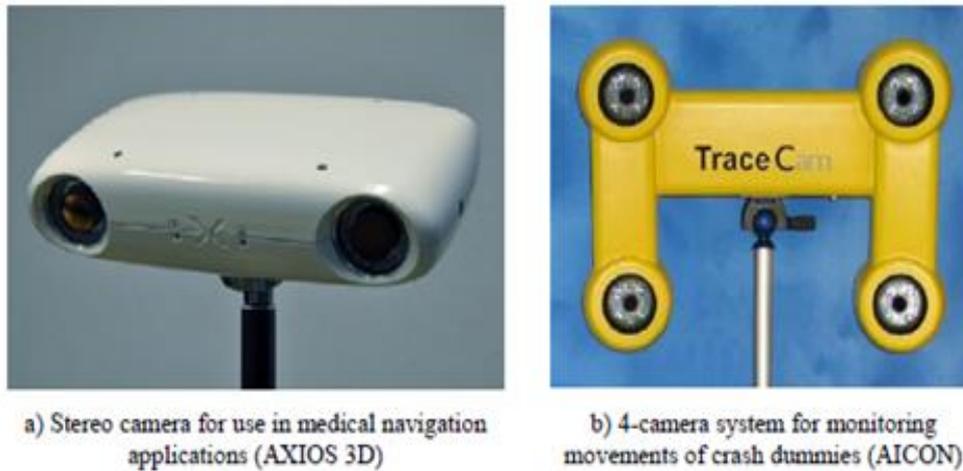


Figure 59: Stéréo et les systèmes multi caméra. [20]

Type d'appareil selon le frame [20] :

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 α 900	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 α NEX-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

Figure 60: Appareils photo numériques terrestres les plus courants [20].

4. Problèmes liés à la photogrammétrie de la végétation :

On a plusieurs problèmes liés à la photogrammétrie de la végétation et parmi ces problèmes on site :

L'ombre :

- L'ombre causée par l'espèce végétale sur le sol et celui causée par certain organe de la même végétation sur les autres induit une hétérogénéité dans l'éclairage pendant la prise de vue.
- Certain objet ou organe seront caché sous l'ombre dans certains angles de prise de vue d'où la difficulté de correspondance entre les points similaires des photos.



Figure 61 : problème d'ombre généré par les feuilles.

Le vent :

- Le mouvement continue ou brutale des organes de l'espèce végétale pendant la prise de vue représente une difficulté pour le traitement de reconstitution 3D.

La complexité géométrique de l'espèce végétale :

- La modélisation des espèces végétaux constitue un grand défi vis-à-vis la complexité géométrique connu par la végétation.
- Le temps de reconstitution est ralenti à cette géométrie complexe.

Le recouvrement (voir chapitre 2).

L'angle de prise de vue (voir chapitre 2).

Le changement de l'éclairage pendant la prise de vue :

- Ce problème est similaire à celui de l'ombre discuté si dessus.
- Un changement d'éclairage pendant la prise de vue causée par le passage de nuages ou une prise de vue dans un temps différé va dégrader la qualité de reconstitution.

L'arrière-plan :

- L'arrière plan non uniforme met la sélection de l'objet cible difficile par rapport à son environnement.

Chapitre 4 : Application

1. Introduction :

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.

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 assistants dans chaque opération choisie, nous jugeons que les concepts de base de la photogrammétrie sont nécessaires et une formation spécifique sur le logiciel est obligatoire pour la bonne manipulation de ce type de logiciel professionnel.

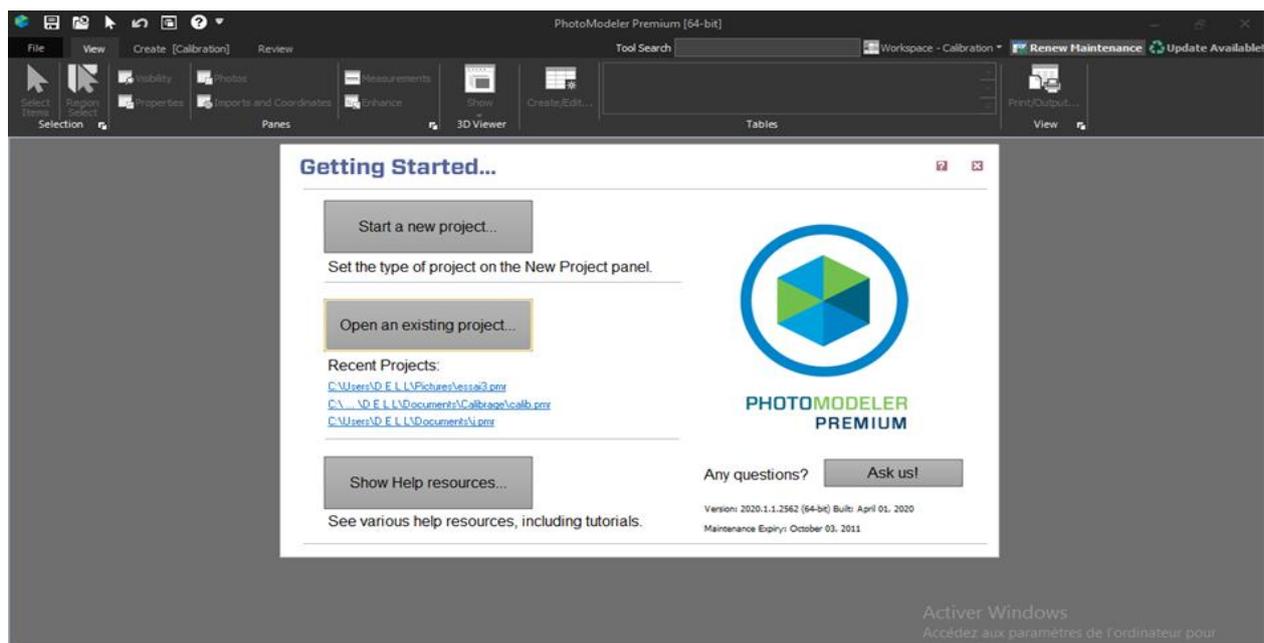


Figure 62: Fenêtre de démarrage pour le logiciel « Photomodeler » 2020.

CHAPITRE 4 : APPLICATION

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

Minimum System Requirement:

OS: Windows 10/8.1/8/7/Vista 64 bit

Processor: Dual Core 2.0GHz or equivalent processor

Memory: 8GB System RAM

Hard Disk Space: 8GB free HDD Space

Video Card: Direct X 9.0c compliant video card with 256 MB of RAM

Recommended System Requirement

OS: Windows 10/8.1/8/7/Vista 64 bit

Processor: Quad-core Intel or AMD CPU

Memory: 16GB System RAM

Hard Disk: 20GB free HDD Space – SSD drive

Video Card: NVIDIA video card with 2GB of RAM and Cuda Capabilities > 2.0

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

3. Essais de reconstitution 3D

Les premiers essais été sur la plante du Yucca_dont sa hauteur ne de passe pas 1 mètre le résultat à aborder a ça fu déformé vu les anomalies suivante :

- ✓ Zone de recouvrement non respecté ;
- ✓ Encadrement de l'objet mal effectué sur certaine pose.



Figure 63: Objet mal encadré.

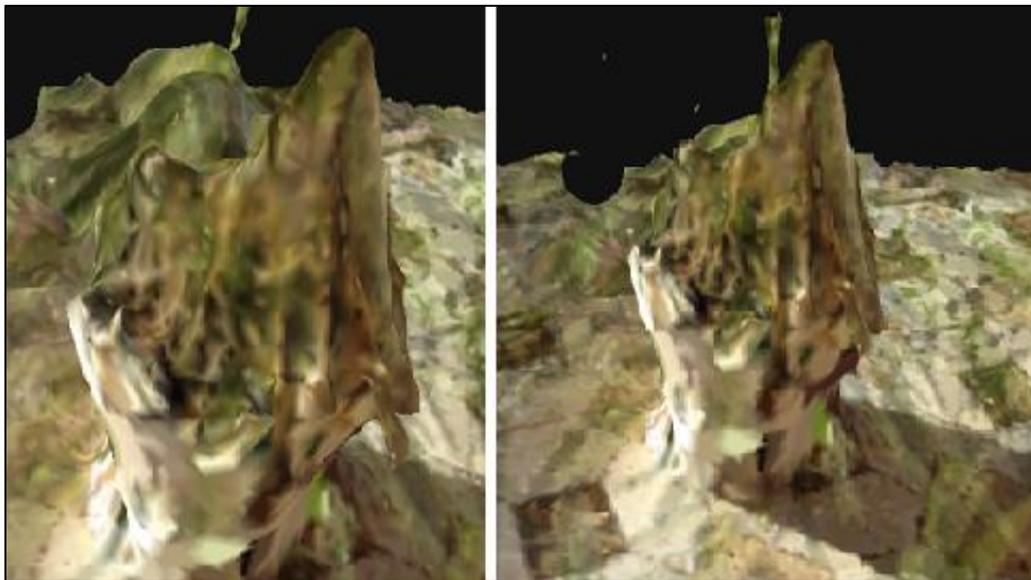


Figure 64: Reconstitution 3D défaillante de la plante yucca.

CHAPITRE 4 : APPLICATION

De ce fait le traitement automatique par le logiciel Photomodeler a écarté la majorité des photos vu les anomalies de se lui si.

La moyenne de recouvrement été malheureusement 21.85 ce qui est malheureusement loin d'être acceptable voir tableau 1 :

La reconstitution Photo coverage (percent)		
Minimum : 3.013	Maximum : 40.77	Average : 21.85

Tableau 1: Résultat de la reconstitution des photos.

Nous avons utilisé une série d'images de quatre espèces végétales de différents types, tailles et formes géométriques comme le montrent les figures ci-dessous :

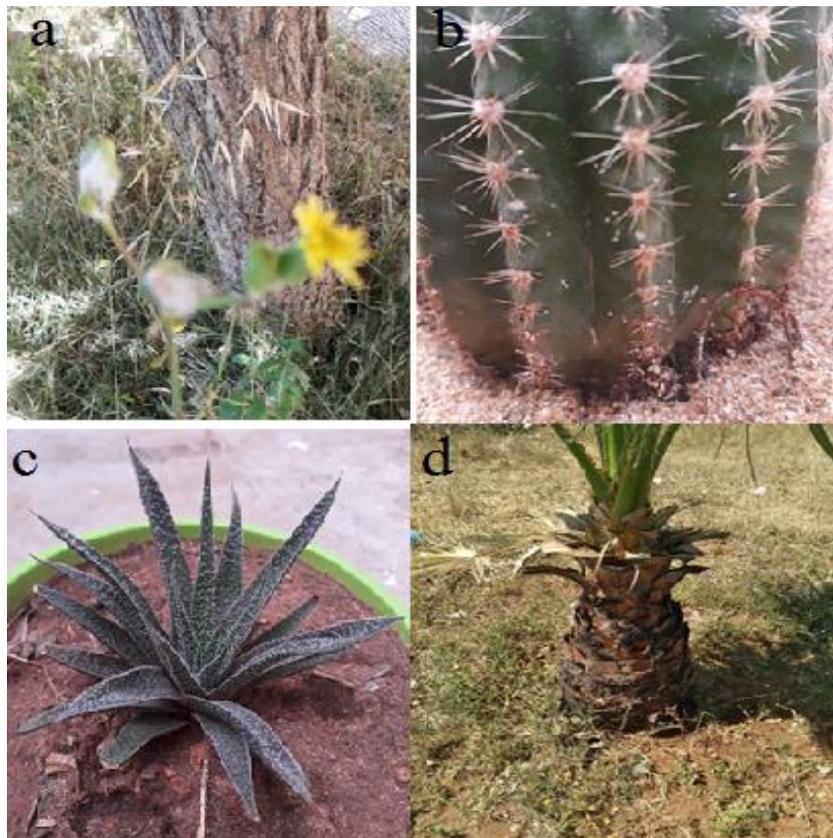


Figure 65: Les espèces végétales (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.

4. La méthodologie

L'organigramme ci-dessous représente la méthodologie que nous avons suivie pour la reconstitution 3D . Nous l'avons divisé en trois phases principales :

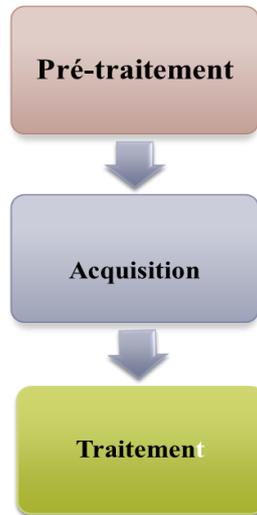


Figure 66: Organigramme des phases de la méthodologie.

5.Phase de prétraitement :

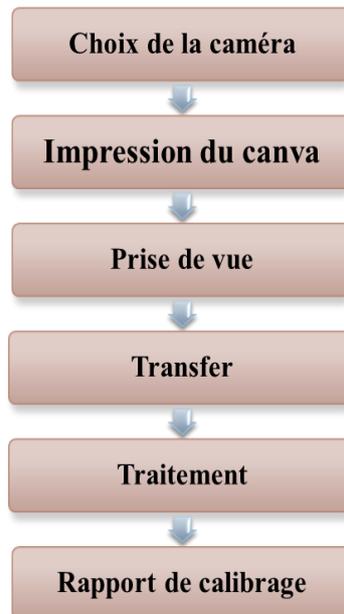


Figure 67: Organigramme des étapes de prétraitement.

Choix de la caméra :

Nous avons utilisé une caméra de téléphone mobile de marque Samsung G7 Pro et Samsung A01 et Samsung A10 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.



Samsung J7 Pro

Samsung A10

Samsung A01

Figure 68: Les appareils utilisés.

Impression du Canvas :

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 :

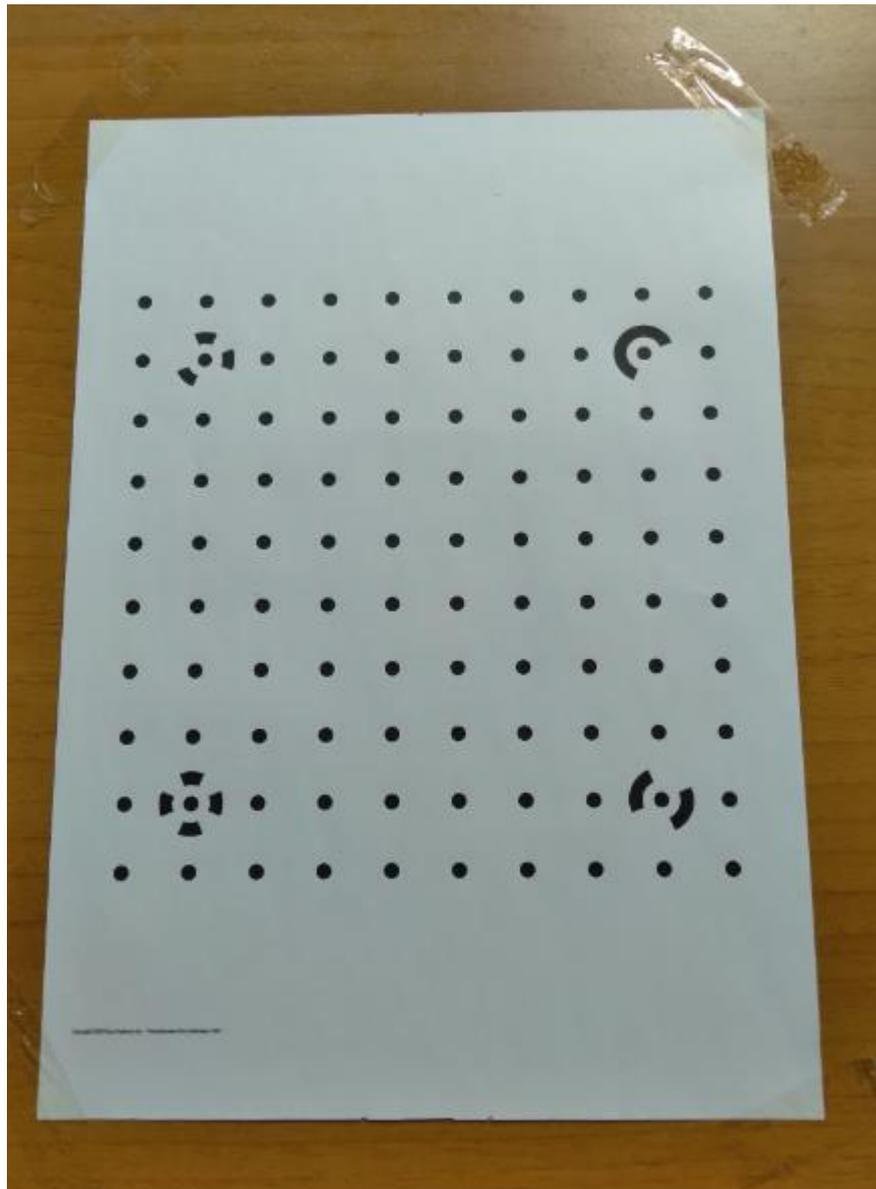


Figure 69: Impression du canevas.

Feature Detection

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
 33 34

Feature detection time: 00:02:47

Matching Setup

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
 33 34

Matching setup time: 00:06:39

Matching and Marking

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
 33 34

Matching completed in: 00:01:40

Orientation

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
 33 34

Orientation completed in: 00:02:25

SmartMatch Complete

Oriented photos: 27 of 34

3D Points: 10188

Project completed in: 00:14:46

Pair 5-4 had 1301 matches found, 1000 used.
 Pair 9-8 had 1797 matches found, 1000 used.
 Pair 3-2 had 1069 matches found, 1000 used.
 Pair 7-6 had 1035 matches found, 1000 used.
 Pair 11-10 had 1830 matches found, 1000 used.
 Pair 12-9 had 120 matches found, 120 used.
 Pair 4-2 had 118 matches found, 118 used.
 Pair 5-3 had 193 matches found, 193 used.
 Pair 8-6 had 196 matches found, 196 used.
 Pair 12-10 had 427 matches found, 427 used.
 Pair 9-7 had 345 matches found, 345 used.
 Pair 4-3 had 635 matches found, 635 used.
 Pair 13-12 had 801 matches found, 801 used.
 Pair 10-8 had 368 matches found, 368 used.
 Pair 11-9 had 417 matches found, 417 used.
 Pair 6-5 had 924 matches found, 924 used.
 Pair 14-12 had 245 matches found, 245 used.
 Pair 8-7 had 999 matches found, 999 used.
 Pair 10-9 had 1342 matches found, 1000 used.
 Pair 6-4 had 204 matches found, 204 used.
 Pair 12-11 had 1059 matches found, 1000 used.
 Pair 14-13 had 531 matches found, 531 used.
 Pair 7-5 had 163 matches found, 163 used.
 Pair 16-15 had 798 matches found, 798 used.
 Pair 11-8 had 131 matches found, 131 used.
 Pair 17-14 had 101 matches found, 101 used.

Figure 70: Traitement automatique sous Photomodeler.

6.Phase d'Acquisition :

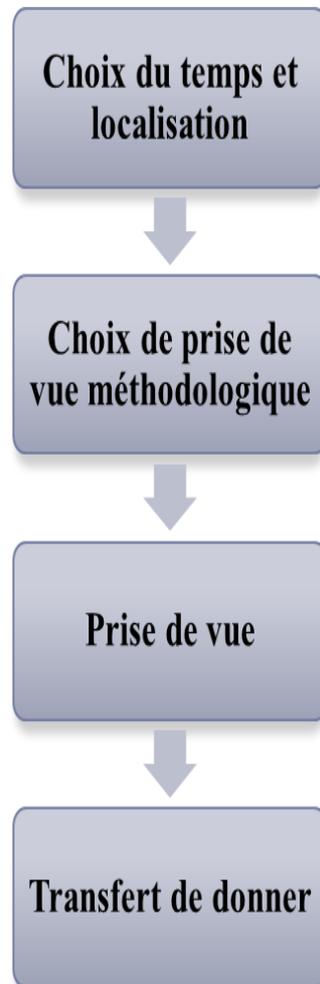


Figure 71: Organigramme des étapes d'Acquisition.

Choix de prise de vue méthodologique :



Figure 72: Méthodologie de Prise de vue pour le palmier.

7. Phase de Traitement :

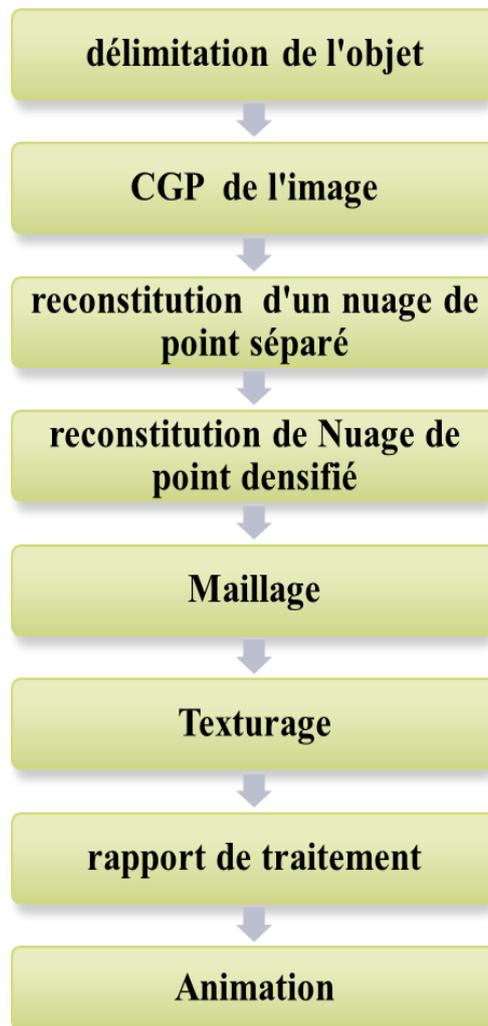


Figure 73: Organigramme des étapes de traitement.

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.

CHAPITRE 4 : APPLICATION

On recherche la correspondance de chaque pixel de l'image N à 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 algorithmes basés que la théorie des ensembles pour traiter le pixel avec son environnement (les pixels qui l'entourent).

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

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



Figure 74: La délimitation de l'objet (c) :Gasteria,(d) : Palmier.

Point de correspondance (contrôle grounds point) CGP :



Figure 75: La correspondance entre les points.

Reconstitution d'un nuage de point séparé :

La figure ci-dessous représente nuage des points séparés pour chacune des :

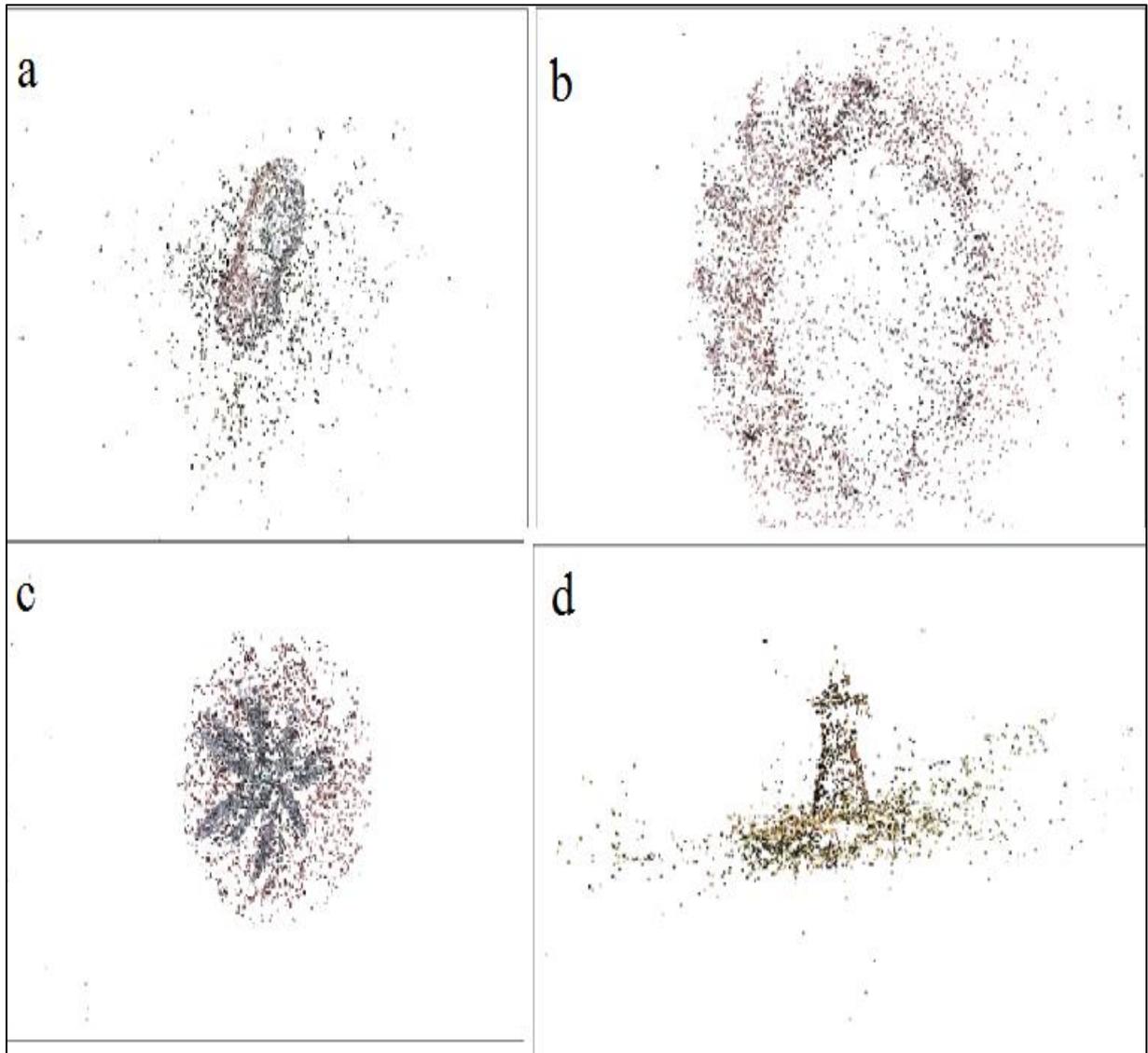


Figure 76: Nuage des points séparés (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.

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.

Reconstitution de Nuage de point densifié :

La quatrième étape de traitement est basée obligatoirement sur l'antécédant ; Photomodeller recherche les points intermédiaires entre les points séparés 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

La figure ci-dessous représente nuage des points densifié pour chacune des :

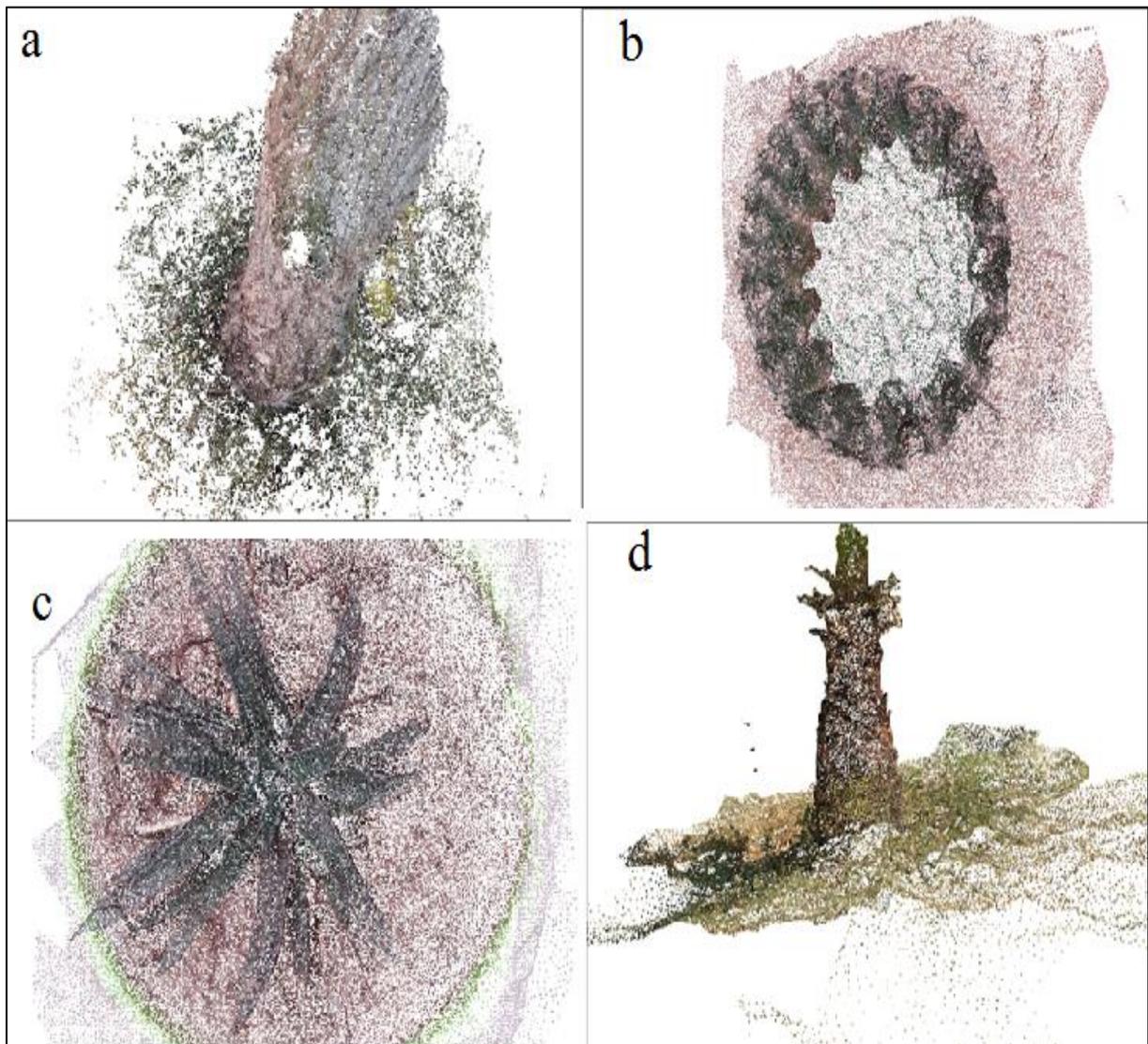


Figure 77: Nuage de point densifié (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.

Maillage :

Afin de convertir le nuage de points en surface, il faut choisir une méthode de maillage. Généralement la triangulation est cette utilisé actuellement pour ce genre de traitement. Tous les point seront relié l'un a l'autre par des triangles.

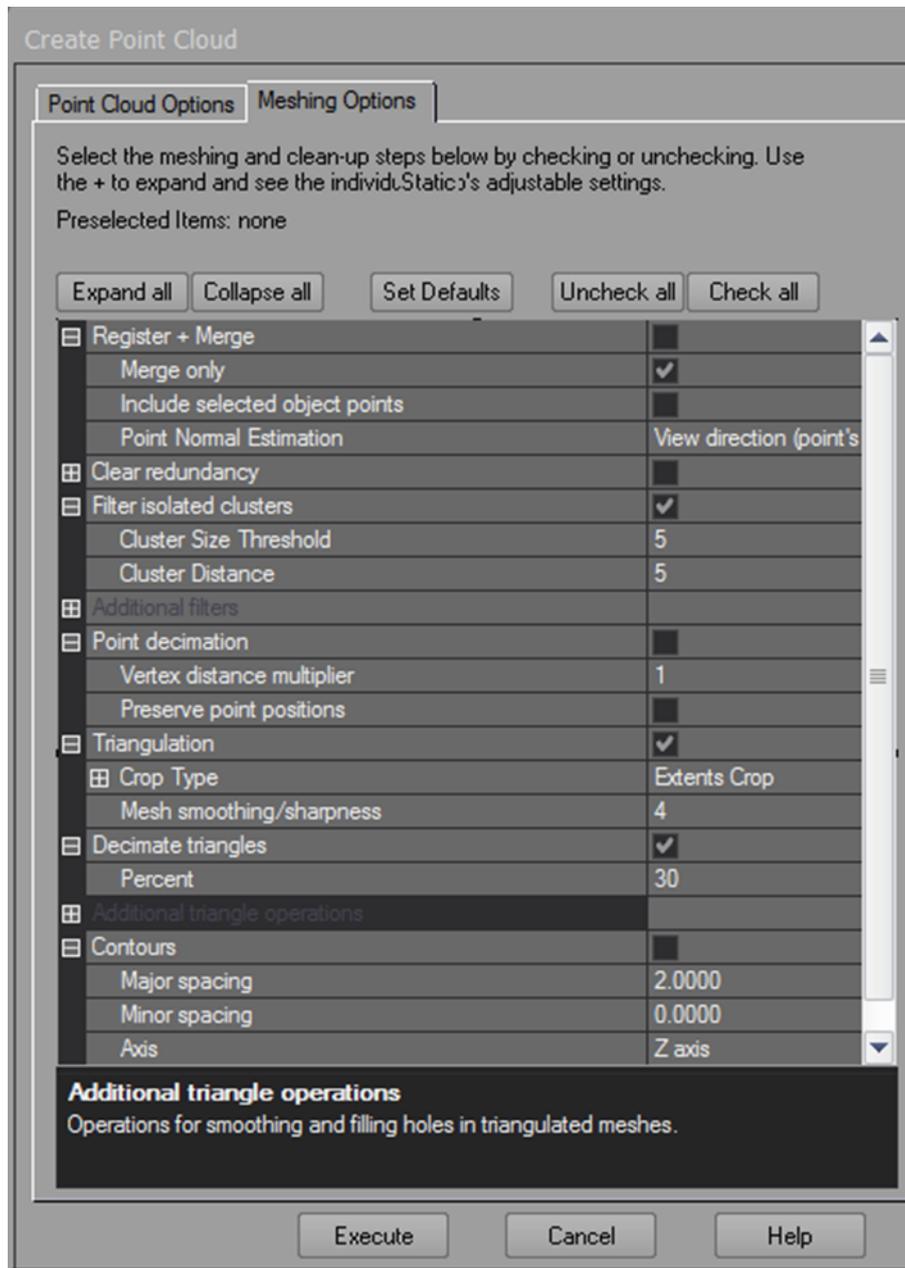


Figure 78 : Paramètre du maillage.

La figure ci-dessous représente le résultat de maillage pour chacune des :

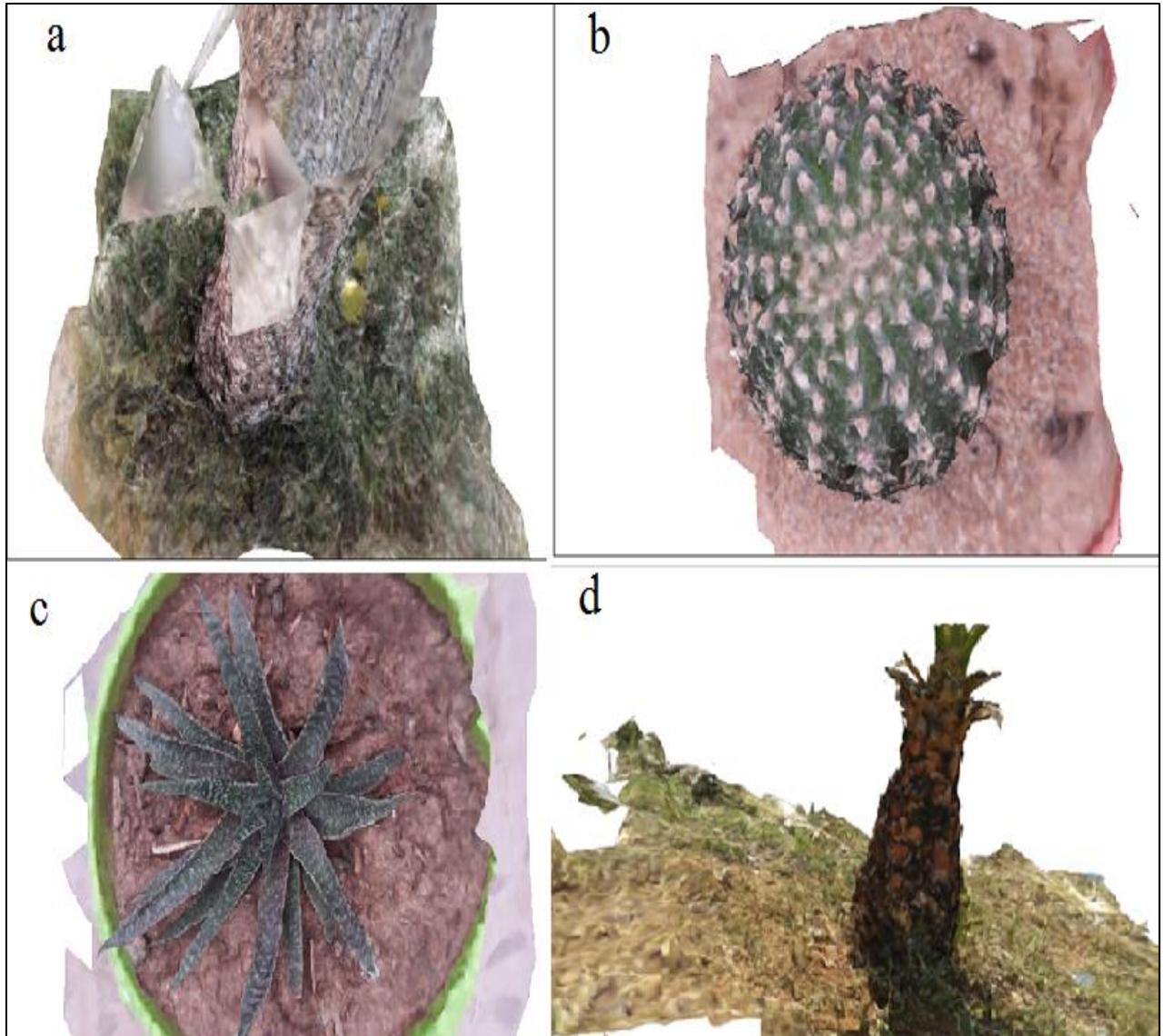


Figure 79: Résultat de maillage (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.

Texturage :

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

La figure ci-dessous représente le résultat de texturage pour chacune des :

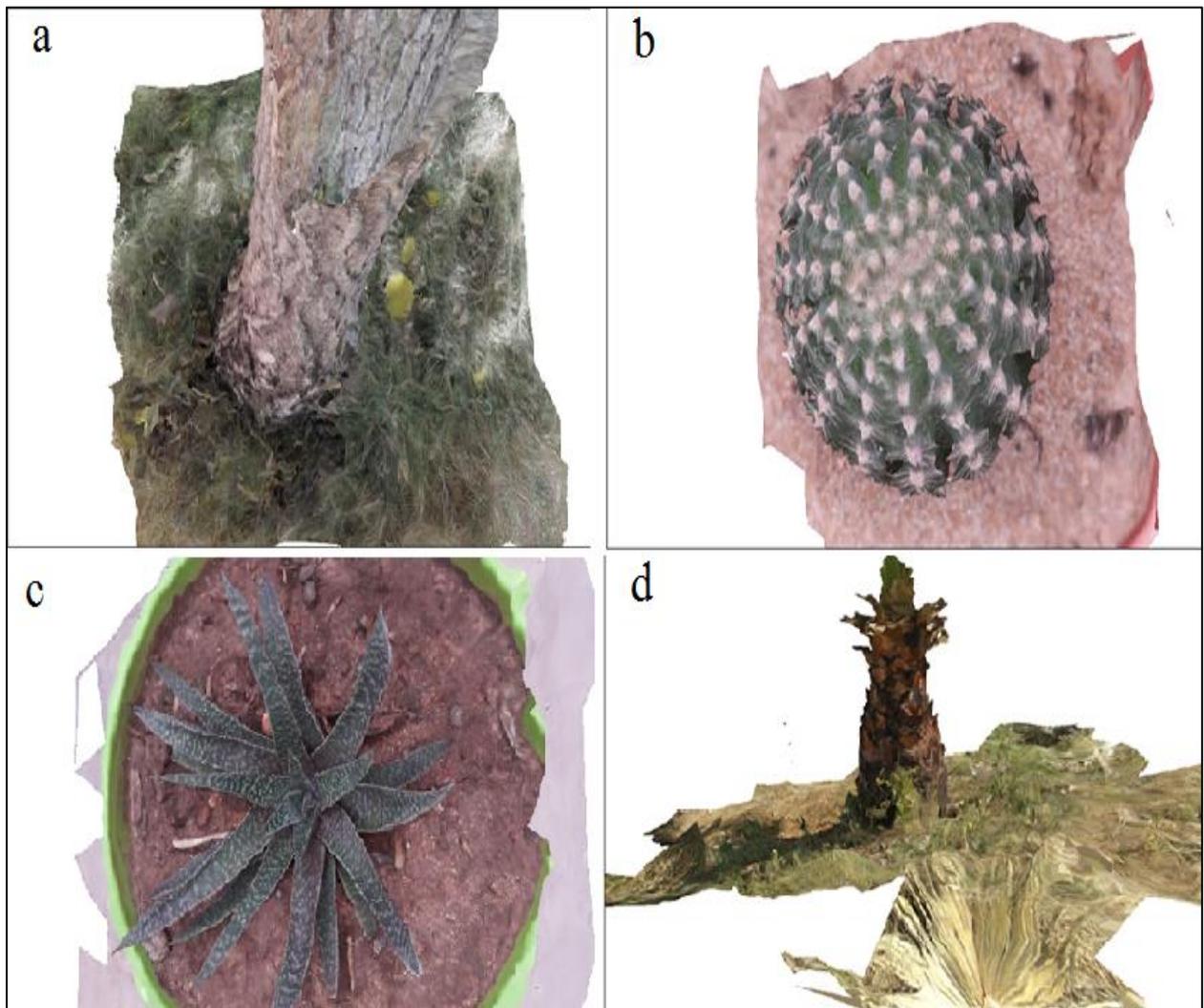


Figure 80: Résultat de Texturage (a) : Tronc d'arbre, (b) : Cactus, (c) : Gasteria, (d) : Palmier.

CHAPITRE 4 : APPLICATION

8. Résultat et discussion :

Les résultats des rapports générés par après les phases de traitement sont synthétisées dans le tableau et l'histogramme ci-après :

Type	EMQ	Nbr Photo	Nbr de point séparé	Point dense	Nbr triangle	Texture	Time processing min
Tronc d'arbre	0,39	39	3818	119771	155317	143037	55
Cactus	0,44	55	7872	187457	209000	209000	48
Gasteria	0,41	46	5635	197110	245377	245377	99
Palmier	0,67	27	3100	74374	290926	8192	21

Tableau 2: Recapulatif des résultats de reconstitution 3D.

Type	EMQ*10000	Nbr Photo*100	Nbr de point séparé	Point dense/100	Nbr triangle/100	Texture/1000	Time processing sec
Tronc d'arbre	3900	3900	3818	1197,71	1553,17	1430,37	3300
Cactus	4400	5500	7872	1874,57	2090	2090	2880
Gasteria	4100	4600	5635	1971,1	2453,77	2453,77	5940
Palmier	6700	2700	3100	743,74	2909,26	81,92	1260

Tableau 3: Recapulatif des résultats avec mise à l'échelle des valeurs.

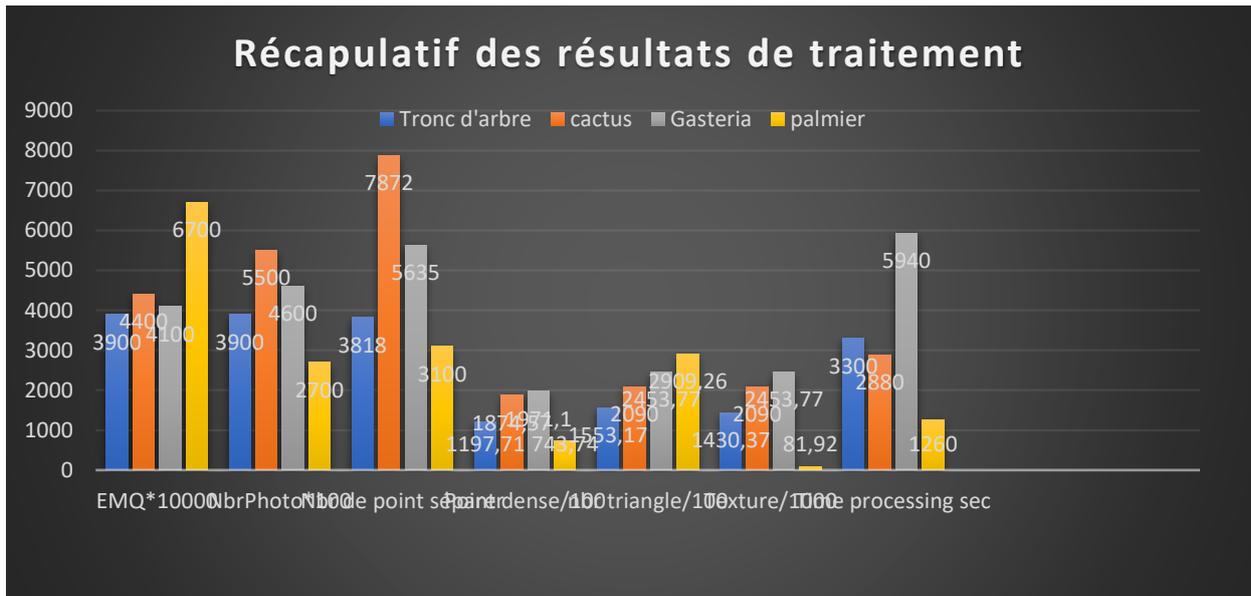


Figure 81: Histogramme Recapulatif des résultats de reconstitution 3D.

On remarque que l'EMQ (Erreur Moyenne Quadratique) est presque identique pour le tronc de l'arbre, le cactus, et pour la Gasteria ; la moyenne enregistrée est de 0,41 avec une moyenne de 46 photo prise sur les objets.

Par ailleurs pour le palmier dont on effectue seulement 27 photos l'écart est 0,67, d'où avec un temps de traitement assez réduit par rapport à l'autre.

Ceci peut être expliqué par les autres critères mentionnés dans le tableau.

En effet le nombre de point de correspondances est de 3100 points pour le palmier avec une densification de 74374 points.

Ce dernier chiffre est le plus petit par rapport aux autres objets qui ont atteint 197110 pour la Gasteria.

Cependant le TIN (Triangular Irregular Network) ou le modèle numérique de surface comporte 290226 triangles ; la valeur la plus élevée par rapport aux autres.

En ce qui concerne le constat sur les espèces en question ; on remarque que l'objet le moins compliqué du Point de vue forme c'est le tronc d'arbre en peut le considérer comme un seul block, l'écorce couvrant le tronc de l'arbre et claire sur toute les coté de prise de vue ; mieux encore la texture est remarquable dans la reconstitution voire figure :



Figure 82: Reconstitution du tronc de l'arbre.

Ceci peut être pour nous la cause directe pour la diminution de ces valeurs de nombre de triangle et du texturage.



Figure 83: Tronc d'arbre dans la réalité.

- **Pour le cactus** cette espèce est caractérisée par le nombre des épines distribuées selon un Texturage texturée.

Ces épines malgré leur dimension millimétrique représentent l'aspect remarquable de l'espèce d'où l'obligation d'être visible dans le modèle reconstitué.

Ces épines sont effectivement ressorties clairement dans le résultat photogrammétrique 3D, mais avec une petite anomalie, il s'agit d'une jointure Triangulaire entre chaque groupement concentrique entre elle voire figure :

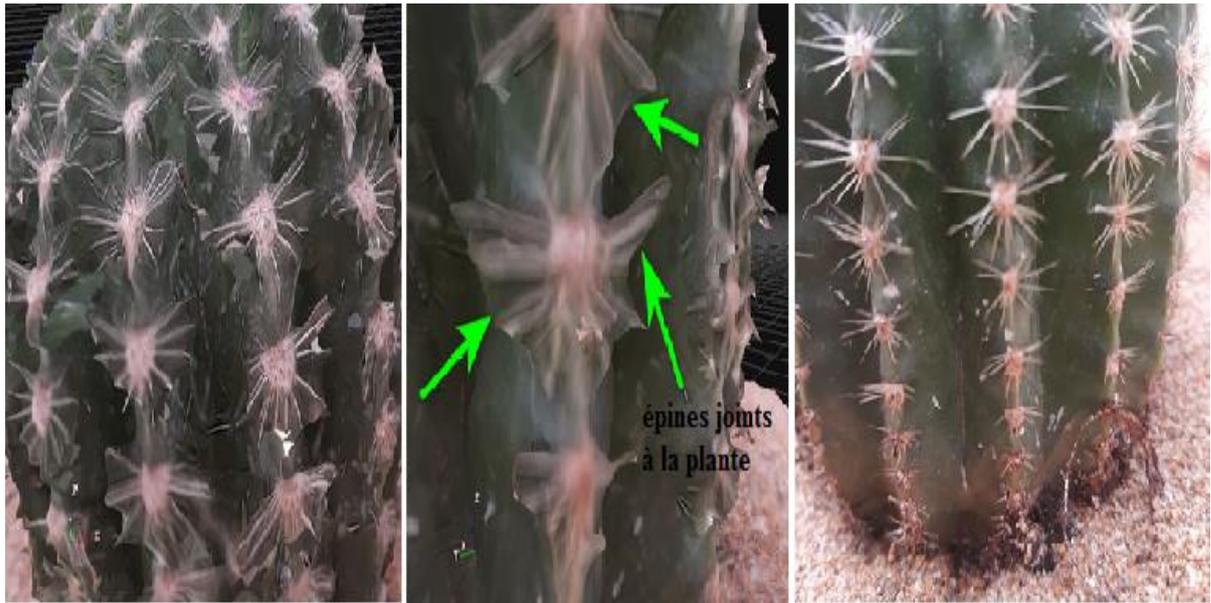


Figure 84: Différence du cactus entre la réalité et la reconstitution 3D.

Pour le gasteria, cette espèce est caractérisée par ces feuilles concentriques soudées vers le centre de la plante avec un texturage bien défini.

La reconstitution du gasteria est parfaite et on remarque que les points ou petites taches couvrant le gasteria sont assez claires sur toute la plante, mais on constate le problème de l'ombre généré par la condensation des feuilles voir figure :



Figure 85 : Problème de l'ombre.



Figure 86: Reconstitution de la plante gasteria.



Figure 87: Gasteria photo réelle.

En conclusion de cette analyse nous pouvons confirmer que la qualité de la reconstitution 3D par photogrammétrie est relative aux éléments suivants :

- 1) La Complexité géométrique ;
- 2) Le niveau de détail ;
- 3) La zone d'ombre ;
- 4) Le nombre de photos et la méthodologie de prise de vue ;
- 5) L'uniformité de l'arrière plan.

Bibliographie :

- [1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/geomatique-42641210/photogrammetrie-rad7418/historique-photogrammetrie-et-vision-par-ordinateur-rad7418niv10001.html>.
- [2] J.-B. Henry, "Cours de Topographie et Topométrie Générale," p. 13.
- [3] <https://journals.openedition.org/insitu/6413>.
- [4] M. Maumont, "L ' espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie," pp. 0–24, 2019.
- [5] M. Carbonnell, "Introduction a l'application de la photogrammetrie aux edifices et aux ensembles monumentaux anciens," pp. 3–33, 1968, [Online]. Available: http://www.international.icomos.org/monumentum/vol4/vol4_1.pdf.
- [6] <https://www.ingeo.fr/photogrammetrie.html>.
- [7] <http://www.heliceo.com/fr/metiers-expertise-photogrammetrie/la-geomatique/#:~:text=La photogrammétrie aérienne,ou dangereux pour un opérateur>.
- [8] <https://www.drone-malin.com/pages/en-savoir-plus/les-services/la-cartographie/la-photogrammetrie-aerienne-par-drone.html>.
- [9] <https://prisedevueaerienne.fr/prestations/photogrammetrie/>.
- [10] <https://www.meixner.com/fr/photogrammétrie/>.
- [11] <https://veillecarto2-0.fr/2017/11/10/a-ne-publier-drones-collectivites/>.
- [12] É. FINOKI, "Mémoire Présenté À L ' École De Technologie Supérieure Comme Exigence Partielle Maîtrise En Génie Concentration Génie Aérospatial Commande De Vol Non-Linéaire En Temps Réel D ' Un Drone À Voilure Fixe," 2015.
- [13] <https://www.studiosport.fr/dji-phantom-4-rtk-a16623.html>.
- [14] <http://www.heliceo.com/fr/metiers-expertise-photogrammetrie/la-geomatique/>.
- [15] <http://www.heliceo.com/fr/produits-pour-geometres/foxywalk-photogrammetrie-terrestre/>.
- [16] <http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec4.html>.
- [17] L. CHANDELIER, "La prise de vues photogrammétriques." 2011.
- [18] https://scientificsentence.net/Equations/Maths2/perspectives/index.php?key=yes&Integer=projections_paralleles.
- [19] http://www.zpag.net/Dessin_Technique/1980/projections.htm.
- [20] B. Bilel and B. Abdelrrahmane, "In,essais de reconstitution 3D par photogrammétrie terrestre," ain temouchent, 2020.
- [21] U. und Thomas, *De Gruyter Textbook Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 2013.
- [22] P. [Pix4D Support], 2021. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558969-Yaw-Pitch-Roll-and-Omega-Phi-Kappa-angles>.
- [23] http://www.bonne-mesure.com/angle_solide.php.

- [24] https://www.pcigeomatics.com/geomatica_help/COMMON/concepts/ExteriorOrientation_explainEO.html.
- [25] <https://www.tiyana.net/fr/les-elements/la-perspective/>.
- [26] <https://avecunphotographe.fr/lechelle-en-photographie/>.
- [27] <http://www.stereoscopie.eu/>.
- [28] F. Lagarde, “Principes de la stéréoscopie ou image en relief (3D),” 2017.
- [29] C3DC, “Guide pour la prise de vue photogrammétrique à destination de la plateforme C3DC,” 2016.
- [30] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-la-triangulation-utilise-dans-la-photogrammetrie-Credits_fig57_332036743#:~:text=Dans la pratique%2C la photogrammétrie,un nuage de points 3D.
- [31] <https://www.techno-science.net/definition/4877.html>.
- [32] <https://www.techno-science.net/definition/4883.html>.
- [33] <https://www.takeoffpros.com/2020/06/16/what-is-photogrammetry/>.
- [34] X. Wang, L. Li, and W. Chai, “Geometric modeling of broad-leaf plants leaf based on B-spline,” *Math. Comput. Model.*, vol. 58, no. 3–4, pp. 564–572, 2013, doi: 10.1016/j.mcm.2011.10.064.
- [35] D. Reiser, A. Kamman, M. Vázquez Arellano, and H. W. Griepentrog, “Using terrestrial photogrammetry for leaf area estimation in maize under different plant growth stages,” *Precis. Agric. 2019 - Pap. Present. 12th Eur. Conf. Precis. Agric. ECPA 2019*, no. July, pp. 331–337, 2019, doi: 10.3920/978-90-8686-888-9_41.
- [36] S. Bauwens, “La photogrammétrie: un procédé pour mesurer les arbres à troncs irréguliers,” 2013.
- [37] <https://www.studiosport.fr/drones-professionnels/photogrammetrie/cameras-c2732.html>.