

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N°



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES

FILIERE : Génie Civil

OPTION : structure

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : ZARROUG MADJDA

Intitulé

**Les différents livrables du levé topographique
avec le scanner 3D**

Soutenu devant le jury composé de

Pr. TITOU MESSAOUD	UNIVERSITE de M'sila	Président
Pr. RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE	UNIVERSITE de M'sila	Encadreur
Mr. KERMICHE ABDELLATIF FAWZI	UNIVERSITE de M'sila	Co-Encadreur
Mr. GUERRAICHE AMMAR	UNIVERSITE de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciement

Avant tout propos, nous remercions Dieu de nous avoir donné la volonté, la force la santé et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance au professeur **RAHMOUNI Zine El Abidine** pour avoir accepté de nous encadrer dans ce travail. Aussi notre co-encadreur **M. KERMICHE Abdellatif Fawzi**, les remercions pour leur implication, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail.

Nous souhaitons également remercier ingénieur **ATTIA Mohamed** pour aide durant le travail mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs propositions sans oublier nos enseignants.

Sans oublier de remercier nos chers parents, qui ont toujours prié pour nous, qui n'ont pas cessé de nous encourager, de nous soutenir et qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui et aussi tous mes amis Pour leur contribution en particulier **Saadia** et **Fatima Zahra** et **Affaf**.

- **ZARROUG Madjda**



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père ZARROUG Ahmed. Qui n'ant pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

Ala femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse mon adorable mère

BOUGUERRA Nouara.

À mes frères et mes sœurs .A mes grands-mères, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

À tous les cousins, les voisins .A tous mes amis et plus particulièrement ceux de notre promotion .et mes camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

- ZARROUG Madjda



Sommaire

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition	3
I.2.1 Building Information Mödling	3
I.2.2 La topographie	4
I.2.3 Le levé topographique	5
I. 3 Les enjeux et les avantages et les inconvénients de BIM	5
I.4 Les Travaux topographiques	9
I.4.1 Le levé topographique	9
I.4.2 Les calculs topométriques	10
I.4.3 Les dessins topographiques	10
I.4.4 Projets d'aménagement	11
I.4.5 Implantations	11
I.4.6 Suivi et contrôle des ouvrages	11
I. 5 Les systèmes de coordonnées	12
I.5.1 Coordonnées géocentrique	12
I.5.2 Coordonnées géographiques	12
I.5.3 Coordonnées plans E, N	13
I.6 Les Mesures linéaires	14

I.6.1 Mesures des distances	14
I.6.2 Mesure directe des distances	14
I.6.3 Mesure de distances à l'aide d'une chaîne	15
I.6.4 Mesure indirecte des distances	15
I.6.5 Les fautes et les erreurs	17
I.7 Mesure des angles	18
I. 7.1 Les appareils de mesures angulaires	18
I. 7.2 Le type d'angles	20
I.8 Le Nivellement	20
I. 8.1 Nivellement direct ou géométrique	21
I. 8.2 Nivellement indirect ou trigonométrique	21
I.9 Le technologie laser scanner3D	22
I.9.1 Historique	22
I.9.2 Définition scanner 3D	24
I.9.3 Levé topographique : quel objectif ?	24
I.9.4 La solution du scanner laser 3D	25
I.9.5 Le levé lasergrammétrique	25
I.9.6 La différence et Similarité du levé topographique et le scanner 3D	26
I.9.7 Les outils	27
CHAPITRE II : EXPLOITATION ET TRAITEMENT DES DONNÉES 3D	
II.1 Introduction	33
II.2 Scanner laser terrestre	34
II.3 Les techniques 3d surfaciques	34
II.3.1 Le LiDAR	35
II.3 .2 La photogrammétrie numérique	35
II.4 Présentation LEICA GEOSYSTEMS	36
II.4.1 LEICA GEOSYSTEMS	37

II.5 Exploitation des données 3D	37
II.5.1 Les données d'entrées : le nuage de point 3D	37
II.5.2 Densité d'un nuage de point	37
II.5.3 Rééchantillonnage du nuage de point	38
II.6 Traitement des données brutes	38
II.6.1 Prétraitement	38
II.6.1.1 Calages des différents nuages de points	38
II.6.1.2 Visualisations et nettoyage des nuages assemblés	38
II.6.1.3 Segmentations manuelles, semi-automatiques ou automatiques	39
II.6.2 Contrôle de la qualité	39
II.7 les logiciels de traitement des nuages de points 3D	39
II.7.1 Cyclone 3DR	39
II.7.2 Realworks	40
II. 7.3 Cyclone	41
II.7.4 Recap pro	42
II.7.5 Choix d'un logiciel de traitement	43
II.8. Modélisation	43
II.8.1 Point	43
II.8.2 La 2D	45
II.8.3 La définition de la3D	47
II.8.3.1 Caractéristiques	48
II.8.3.2 Principaux usages	48
II.8.4 Typologies des modèles 3D	48
II.9 Les logiciels de modélisation 3D	50

II.9.1 Allplan	50
II.9.2 Autodesk	51
II.9.2.1 Autocad architecture	51
II.9.2.2 Revit	51
II.9.3 SketchUp	52
II.9.4 Choix d'un logiciel de modélisation	53
II.10 Les outils informatiques dans la conception architecturale et Génie civil	54
II.10.1 Le DAO	54
II.10.2 La CAO	54
II.11 La différence entre la CAO 3D et le BIM	55
II.12 Le cheminement de l'information 3D	56

CHAPITRE III : CAS PRATIQUE

III.1 Introduction	58
III.2 Modélisation Numérique de Terrains	59
III.2.1 Extraction de Terrain	59
III.2.2 Couleur selon une direction	59
III.2.3 Courbes de Niveaux	59
III.2.4 Lignes de Rupture	60
III.3 Présentation de projet université Mohamed Boudiaf - m'sila	60
III.4 Topographie : Profils	60
III.5 Inspection 3D d'université ou inspection CAO 2D de Bâtiment	61
III.5.1 Se familiarisé avec l'aspect de votre nuage de points	61
III.5.2 Nettoyer ou séparer manuellement le nuage	61
III.5.3 Extraction automatique de terrain	62

III.5.4 Les détails ici montrent la précision du scanner	62
III.5.5 Modifier le mappage des couleurs	62
III.5.6 Ajouter des étiquettes d'inspection	63
III.5.7 Personnaliser le rapport	63
III.5.8 Exporter les résultats	63
III.6 Exemple Calculer le volume Dans logicielle Cyclone3DR	64
III.7 Une image de Projet Calculer le volume	64
III.8 Les étapes de l'opération Calcul de volumes	64
III.8.1 Importer les scans (Ouvrez le fichier)	64
III.8.2 Nettoyer le nuage de points	64
III.8.3 Créer maillage3D	65
III.8.4 Fermer le maillage	65
III.8.5 Erreur d'écart affiné	65
III.8.6 Tracer les limites stock	65
III.8.7 Couper le stock	66
III.8.8 Fermer le maillage	66
III.8.9 Mesurer le volume	66
III.8. 10 Tracer les limites d'un autre stock	66
III.8.11 Couper d'un autre stock	67
III.8.12 Calculer le volume sur un niveau donné	67
III.8.13 Choisisse l'unité pour le volume	67
III.8. 14 Projet Calcul du volume entre deux surfaces différentes niveaux	67
III.8.15 Projet final avec maillage texturé	68
III.8.16 Tous les volumes avec maillage coloré le long de l'élévation	68

Conclusion

Conclusion générale

Référence

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Comparer le domaine de la construction avec d'autres domaines au fil du temps	2
Figure I.2 : Terme BIM	4
Figure I.3 : Etymologie du mot topographie.	4
Figure I.4 : Une carte topographique	5
Figure I.5 : Un plan topographique	5
Figure I.6 : Petit extrait d'une carte topographique	5
Figure I.7 : Cycle de vie d'un bâtiment en BIM	6
Figure I.8 : Coordonnées cartésiennes	13
Figure I.9 : Coordonnées géographiques de la terre	13
Figure I.10 : Les 3 types de projection	14
Figure I.11 : Principe de mesure par stadimétrie	16
Figure I.12 : Un IMEL avec émetteur et récepteur	17
Figure I.13 : Théodolite ZEISS T1	19
Figure I.14 : Schéma de principe d'un théodolite	19
Figure I.15 : Angle vertical	20
Figure I.16 : Angle horizontal	20
Figure I.17 : Nivellement direct	21
Figure I.18 : Nivellement indirect	22
Figure I.19 : Le scanner 3D Leica BLK360 numérisant Bâtiment	25
Figure I.20 : Le Leica BLK360	27
Figure I.21 : Le scanner 3D Laser RTC 360	29
Figure I.22 : Les Scan Station P40	30
Figure I.23 : Le Leica iCON robot 60	31

Chapitre II

Figure II.1 : Acquisition de façade au scanner laser et au tachéomètre sans réflecteur	34
---	----

Figure II.2 : Scanner laser 3D en station pour le relevé terrestre	35
Figure II.3 : La photogrammétrie numérique par drone	36
Figure II.4 : Extraction des plans avec le module Building Extractor	40
Figure II.5 : Visualisation d'un nuage contenant 7,7 millions de points sous Realworks	41
Figure II.6 : Arborescence d'un projet	41
Figure II.7 : Nuage de points noir & blanc issu d'un relevé au Scanner laser 3D	44
Figure II.8 : Nuage de points colorisé issu d'un relevé au Scanner laser 3D	44
Figure II.9 : Vue Axonométrique d'une Tranche de Points Extraite d'un Nuage	45
Figure II.10 : Génération de dessins 2D de nuages de points à l'aide d'Autodesk Recap	46
Figure II.11 : Vectorisation semi-automatisée sous PointCab	46
Figure II.12 : Orthophoto Intérieure Élévation sur Bureau	47
Figure II.13 : Orthophoto Intérieure Coupe dans Bâtiment	47
Figure II.14 : Orthophoto Importée en Arrière-Plan dans la CAO comme Aide au Dessin 2D	47
Figure II.15 : Module en 3D	48
Figure II.16 : Un nuage de points de haute résolution avec information	49
Figure II.17 : Un modèle filaire	49
Figure II.18 : Un modèle nuage de points de haute résolution avec information	50
Figure II.19 : Exemple de structure modelée dans Autodesk Revit	52
Figure II.20 : Segments extraits à partir de RealWorks	53
Figure II.21 : Développement de la maquette numérique	55
Figure II.22 : Le cheminement de l'information 3D	56

Chapitre III

Figure III.1 : Extraction de terrain	59
Figure III.2 : Couleur selon une direction	59
Figure III.3 : Courbes de Niveaux	60
Figure III.4 : Lignes de Rupture	60
Figure III.5 : Projet université Mohamed Boudiaf - m'sila	60

Figure III.6 : Nuage de points de projet université Mohamed Boudiaf - m'sila	61
Figure III.7 : Sélectionner manuellement les points pertinents	61
Figure III.8 : Extraction automatique de terrain et maillage 3D	62
Figure III.9 : Couleur selon l'axe Z université Mohamed Boudiaf - m'sila	62
Figure III.10 : Les détails du scanner	62
Figure III.11 : Ajouter des étiquettes d'inspection	63
Figure III.12 : Personnaliser le rapport	63
Figure III.13 : Exporter les résultats	63
Figure III.14 : Projet Calcule des volumes	64
Figure III.15 : méthode Ouvrez le fichier	64
Figure III.16 : Nettoyer le nuage de points Avant et après	64
Figure III.17 : Création d'un maillage 3D	65
Figure III.18 : Fermer le maillage	65
Figure III.19 : Création d'un maillage3D final du terrain naturel	65
Figure III.20 : Tracer les limites stock avant et après	65
Figure III.21 : Maillage inspecté	66
Figure III.22 : sections inspectées	66
Figure III.23 : Mesurer le volume	66
Figure III.24 : Création d'un maillage du terrain naturel	66
Figure III.25 : Maillage inspecté	67
Figure III.26 : Le volume sur un niveau	67
Figure III.27 : Volume au-dessus/au-dessous du niveau	67
Figure III.28 : Calcul du volume entre deux surfaces différentes niveaux	67
Figure III.29 : Calcul du volume à différents niveaux	68
Figure III.30 : Calcul du volume à différents niveaux avec maillage coloré	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tolérances de précisions fixées par la norme européenne CEE.	15
Tableau 2 : Nom de l'élément Théodolite	19
Tableau 3 : le Différence et similitude du levé topographique et le scanner 3D	26
Tableau 4 : Caractéristiques Leica BLK360	27
Tableau 5 : Caractéristiques Laser RTC 360	29
Tableau 6 : Caractéristiques Leica iCON robot 60	31
Tableau 7 : Avantages et inconvénients des logiciels de traitement testés	43

Liste des symboles

BIM : Building Information Modeling
CAO : Conception Assistée Par Ordinateur
DAO : Dessin Assisté Par Ordinateur
CEE : Communauté Économique Européenne
GPS : Global Positionne System
SIG : Système D'information Géographique
I M E L : Instruments de Mesure Électronique des Longueurs
I M E D : Instruments de Mesure Électronique des Distances
SI : Système Information
SIFT : Scale Invariant Feature Transform
IFC : Industry Fondation Classes
MNT : Modèles Numériques de Terrains

Résumé

Depuis plusieurs années, le Laboratoire MAP-PAGE de l'INSA de Strasbourg focalise ses recherches sur des thématiques de modèles tridimensionnels d'objets urbains et patrimoniaux.

Est une révolution dans l'industrie de la construction. L'objectif principal étant d'améliorer le coût et le temps et la qualité du travail pour chaque collaborateur en appuyant sur des outils numériques. Le sujet proposé montre en détail la suite d'opération, Le scanner laser 3D est une nouvelle génération de capteur topographique permettant d'enregistrer plusieurs millions de points en 3D, en quelques minutes, à des portées dépassant plusieurs centaines de mètres, à une précision centimétrique.

La méthode de saisie est essentiellement la photogrammétrie à partir de photographies terrestres et depuis quelques années la lasergrammétrie utilisant un scanner 3D. La première méthode est à présent très connue et bien éprouvée.

Dans la deuxième méthode, l'exploitation d'un nuage de points, permet d'obtenir des points, lignes, surfaces caractéristiques, puis d'en reconstruire un modèle 3D surfacique. Ce dernier, texturé pour se rapprocher d'une réalité virtuelle, est structuré très strictement pour pouvoir être géré à plusieurs niveaux de détails. Dans un contexte global, le niveau de détail est très sommaire, les bâtiments consistent alors en des enveloppes peu détaillées, mais recouvrant des villes entières. À un niveau plus fin, pour quelques bâtiments privilégiés, les façades sont décrites et modélisées de façon beaucoup plus fine : nous y retrouvons les portes, fenêtres, détails de façade, etc. Enfin, un niveau encore plus fin, permet de gérer les volumes, l'organisation des intérieurs des bâtiments.

Cette présentation propose l'étude des systèmes de bases de données permettant de structurer ces différentes étapes et les données qui en découlent et les perspectives de traitements associées à ces systèmes et données 3D.

Mots clés : scanner 3D, levé topographie, nuages de points, L'assemblage, Revit, CAO, BIM, Leica geosystems, Leica Cyclone 3DR, Leica BLK360

Abstract

For several years, the MAP-PAGE Laboratory of INSA Strasbourg has focused its research on the thèmes of three-dimensional models of urban and heritage objects.

Is a révolution in the construction industry. The main objective being to improve the cost and the time and the quality of work for each employee by using digital tools. The proposed subject shows in detail the next step, The 3D laser scanner is a new generation of topographic sensor making it possible to record several million points in 3D, in a few minutes, at ranges exceeding several hundred meters, at a precision centimeter.

The capture method is essentially photogrammetry from terrestrial photographs and for several years lasergrammetry using a 3D scanner. The first method is now well known and well proven.

In the second method, the exploitation of a point cloud makes it possible to obtain characteristic points, lines, surfaces, then to reconstruct a 3D surface model. The latter, textured to approximate a virtual reality, is structured very strictly to be able to be managed at several level of detail. In a global context, the level of detail is very basic, the buildings then consist of envelopes with little detail, but covering entire cities. At a finer level, for some privileged buildings, the façades are described and modeled in a much finer way: we find the doors, Windows, façade détails, etc. Finally, an even finer level, makes it possible to manage the volumes, the organization of the interiors of the buildings.

This presentation proposes the study of database systems making it possible to structure these different stages and the data which result from them and the perspectives of processing associated with these systems and 3D data.

Keywords : 3D scanner, topography survey, point clouds, Assembly, Revit, CAD, BIM, Leica geosystems, Leica Cyclone 3DR, Leica BLK360

ملخص

لعدة سنوات، ركز مختبر MAP-PAGE في INSA Strasbourg أبحاثه على موضوعات النماذج ثلاثية الأبعاد للأشياء الحضرية والتراثية.

هو ثورة في صناعة البناء. الهدف الرئيسي هو تحسين التكلفة والوقت وجودة العمل لكل موظف باستخدام الأدوات الرقمية. يوضح الموضوع المقترح بالتفصيل الخطوة التالية، الماسح الضوئي بالليزر ثلاثي الأبعاد هو جيل جديد من أجهزة الاستشعار الطبوغرافية التي تتيح تسجيل عدة ملايين من النقاط في صورة ثلاثية الأبعاد، في بضعة دقائق، على نطاقات تتجاوز عدة مئات من الأمتار، عند سنتيمتر دقيق.

طريقة الالتقاط هي في الأساس القياس التصويري من الصور الأرضية ولعدة سنوات قياس الليزر باستخدام ماسح ضوئي ثلاثي الأبعاد. الطريقة الأولى معروفة الآن ومثبتة جيدًا.

في الطريقة الثانية، يتيح استغلال نقطة سحابة الحصول على نقاط مميزة وخطوط وأسطح، ثم إعادة بناء نموذج سطح ثلاثي الأبعاد. هذا الأخير، الذي تم تصميمه لتقريب الواقع الافتراضي، منظم بشكل صارم للغاية بحيث يمكن إدارته على مستويات متعددة من التفاصيل. في السياق العالمي، يكون مستوى التفاصيل أساسيًا للغاية، وتتكون المباني بعد ذلك من مزاريف مع القليل من التفاصيل، ولكنها تغطي مدناً بأكملها. على مستوى أدق، بالنسبة لبعض المباني المتميزة، يتم وصف الواجهات وتصميمها بطريقة أدق بكثير: نجد الأبواب والنوافذ وتفاصيل الواجهة وما إلى ذلك. وأخيرًا، يتيح المستوى الأكثر دقة إدارة الأحجام، تنظيم الديكورات الداخلية للمباني.

يقترح هذا العرض دراسة أنظمة قواعد البيانات مما يجعل من الممكن هيكلة هذه المراحل المختلفة والبيانات الناتجة عنها ووجهات نظر المعالجة المرتبطة بهذه الأنظمة والبيانات ثلاثية الأبعاد.

الكلمات الرئيسية: الماسح الضوئي ثلاثي الأبعاد. المسح الطبوغرافي. السحب النقطية. التجميع. ريفيت. التصميم بمساعدة الكمبيوتر. نمذجة معلومات البناء. أنظمة لاياك الجيولوجية، لاياك سايبكلون 3D، لاياك 360BLK

Introduction générale

Aujourd'hui, nous sommes confrontés à une demande croissante de la nouvelle technologie et des professionnels bien formés capables de la mettre en œuvre. Récemment, la nouvelle idée d'avoir une attention intelligente scanner 3D complète a obligé les entreprises de construction à adopter les nouvelles connaissances et à les mettre en œuvre dans leurs projets.

Le problème est que le contrôle du temps, des coûts et des déchets est une préoccupation primordiale pour toutes les parties impliquées dans les projets de construction. De nombreux problèmes liés aux questions de contrôle résultent d'une communication inadéquate des informations au sein des organismes contractants ou entre les organismes contractants et autres organismes de conception. La quantité d'informations impliquées dans tout projet de construction du début à la fin ne doit pas être sous-estimée. À tout stade particulier du projet, différents types d'informations sont requis par diverses personnes dans divers formats. Cela suggère la nécessité d'efforts précoces de la part de tous les participants pour identifier et résoudre les problèmes potentiels en garantissant une conception et une construction complètes et correctes.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique en définissant le potentiel de processus scanner laser 3D, son fonctionnement, et les concepts associés à ce dernier.

Le second chapitre explique l'exploitation de données 3D, les logiciels de traitement de nuage de points ainsi que les logiciels de modélisation.

Le troisième chapitre est consacré à une étude sur site avec une équipe au travail.

Enfin, une conclusion générale du mémoire et une liste bibliographique.

CHAPITRE I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Le scanner laser 3D a rencontré un développement technologique impressionnant au cours de la dernière décennie, ainsi qu'un intérêt croissant dans plusieurs secteurs d'activité. C'est devenu une solution innovante pour des relevés as-built. Il offre des avantages considérables en termes de précision, niveau de détail, vitesse de relevé, confort et sécurité du géomètre. L'opérateur du scanner peut en un rien de temps capturer l'environnement complet en 3 dimensions, y compris le moindre détail. Le scanning se veut être une alternative innovante pour les instruments et méthodes de relevés topographiques classiques. Néanmoins, pour plusieurs raisons, son utilisation est loin d'être répandue chez les entrepreneurs et bureaux d'études.

Dans de nombreux projets de construction et à différents stades de ceux-ci (avant-projet, conception, dimensionnement, exécution, ...) l'approche BIM (Building Information Modeling) est choisie et requiert de l'information as-built. De l'information fiable et complète ne peut pas toujours être récoltée dans des plans as-built, lorsque ceux-ci existent. Par ailleurs, mener des relevés topographiques classiques avec un haut niveau de détail pour mettre en plan des structures est souvent une action coûteuse, laborieuse et longue.

Une application spécifique du scanning laser 3D est l'utilisation des nuages de points pour construire un modèle BIM. A ce jour, il n'y a encore que très peu d'informations et d'expertise concernant ce processus de modélisation BIM dans des projets de construction afin de guider et de faciliter l'utilisation des scanners. La rentabilité économique de ces processus, ainsi que la plus-value qu'apporte leur intégration dans des projets BIM ont également été analysés. [36]

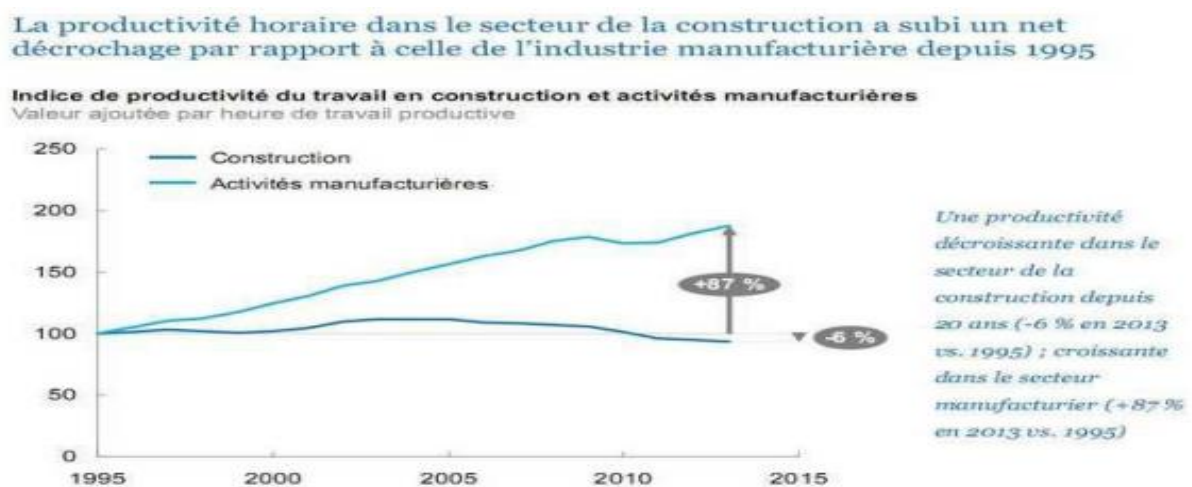


Figure I.1 : Comparer le domaine de la construction avec d'autres domaines au fil du temps [2]

I.2 Definition

I.2.1 Building Information Modeling

Le BIM vient de l'anglais : Building Information Modeling

Model

Management

Le BIM (Building Information Modeling) n'est ni un logiciel, ni une maquette numérique, mais en réalité, les maquettes numériques ne constituent qu'un support une méthode de travail pour les différents intervenants. Sa définition peut être très différente d'un projet de construction à un autre. [6]

On peut traduire cette terminologie par "Maquette numérique du Bâtiment" ou encore par "Modélisation des informations d'un Bâtiment". Il est difficile de trouver une définition du "BIM" acceptée par tous. En effet, lorsque l'on parle de BIM on parle essentiellement des méthodes de travail qui reposent sur des modèles 3D, qui eux contiennent de nombreuses informations. [12]

Le cœur du BIM ce sont tous les processus de gestion de l'information qui l'englobent et alimentent les différents modèles.

Ce concept a pour but de générer plus d'échanges entre les différents acteurs pour non seulement optimiser le projet mais aussi apporter à chacun une vision plus globale en prenant conscience des problématiques des autres métiers. Le principe est dans un premier temps d'effectuer les études techniques le plus en amont possible du projet afin de détecter au maximum les interférences des métiers et de proposer des solutions afin de les résoudre. Le BIM change l'acte de construire en accordant plus de temps à la conception, ce qui permet d'alléger la phase travaux où l'exécution serait rendue plus facile. [12]

Le BIM est un processus qui s'inscrit dans un projet de A à Z :

- Lors de l'élaboration.
- Lors de la construction.
- Lors de la livraison.
- Lors de l'exploitation. [12]

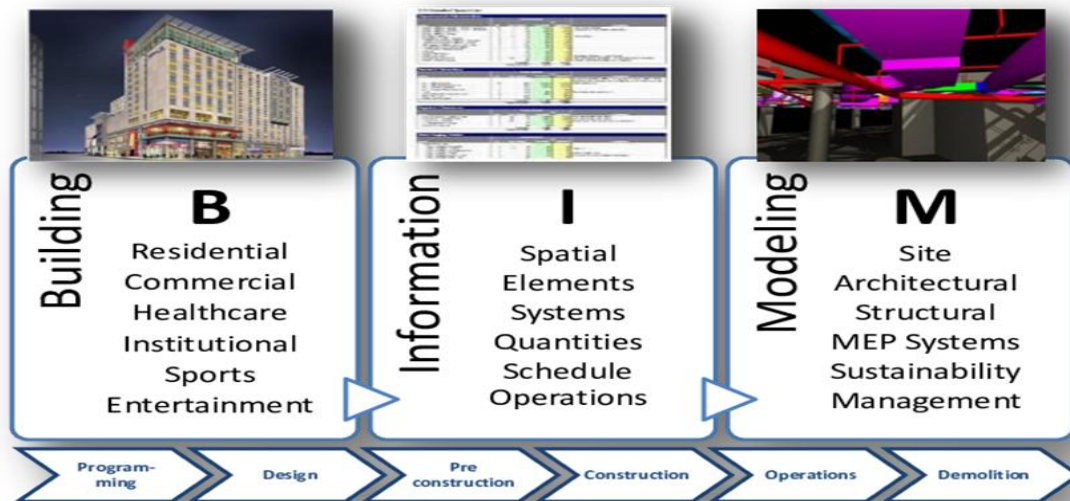


Figure I.2 : Terme BIM [2]

D’une manière générale, le mot BIM est utilisé dans le sens de sa signification première : « Building Information Modeling », se traduisant par Modélisation des Informations du Bâtiment. C’est la définition retenue dans ce mémoire. Il regroupe les trois notions suivantes :

- Une maquette numérique et sa base de données.
- Une structuration des données.
- Une gestion des flux d’informations. [25]

I.2.2 La Topographie

La topographie : Origine du mot (des grecs topos = lieu et graphein = dessiner).

Il peut définir, La Topographie : est la science qui a pour but de représenter sur une feuille plane une portion de la surface terrestre à une échelle donnée. Et se représente sous forme de plans, de cartes ou profils. La figure I.3 Schématise l'origine formelle du mot “topographie”. [4]

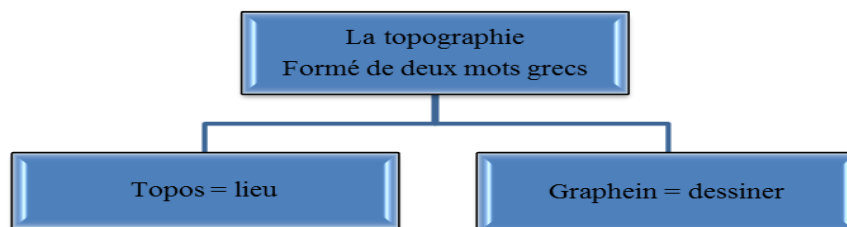


Figure I.3 : Etymologie du mot topographie. [4]

- Une carte, représente une surface très étendue généralement à une échelle très petite.
- Un plan, représente une surface plus restreinte et à une échelle très grande.

- On appelle échelle, le rapport de similitude de la figure du plan à la figure de terrain ; autrement dit c'est le rapport entre la distance qui sépare deux points sur la carte et la distance horizontale correspondante sur le terrain. Ce rapport s'exprime par une fraction simple dont le numérateur est 1. [5]

Les principales échelles employées en topographie sont : $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{2000}$, $\frac{1}{5000}$, $\frac{1}{50000}$, $\frac{1}{100000}$, $\frac{1}{200000}$ ^{ème} ,



Figure I.4: Une carte topographique. [2]



Figure I.5: Un plan topographique. [2]



Figure I.6. Petit extrait d'une carte topographique au $\frac{1}{25000}$ ^{ème} . [4]

I.2.3 Le levé topographique

C'est l'ensemble des opérations destinées à recueillir sur le terrain les éléments nécessaires à l'établissement d'un plan ou d'une carte. Il implique la mesure locale d'un nombre important de points permettant la description des objets géographiques. [4]

I.3 Les enjeux et les avantages et les inconvénients de BIM

❖ Les enjeux du BIM

Le BIM est vécu comme une révolution dans le domaine de la construction. Les nombreux intervenants de ce secteur collaborent peu ensemble. Les échanges d'information entraînent parfois des pertes ou des informations erronées entre les différentes phases du projet. Une construction est donc un projet qui s'avère généralement long et coûteux.

Les objectifs du BIM sont multiples. Le travail collaboratif en est la base fondamentale. Cette interaction entre les acteurs permet une rationalisation des échanges, une unicité des documents et par conséquent une pérennisation ainsi qu'une fiabilisation de l'information. Ces éléments permettent une meilleure gestion du projet et limitent les risques de désagréments liés à une mauvaise organisation ou communication entre les différents intervenants. [25]

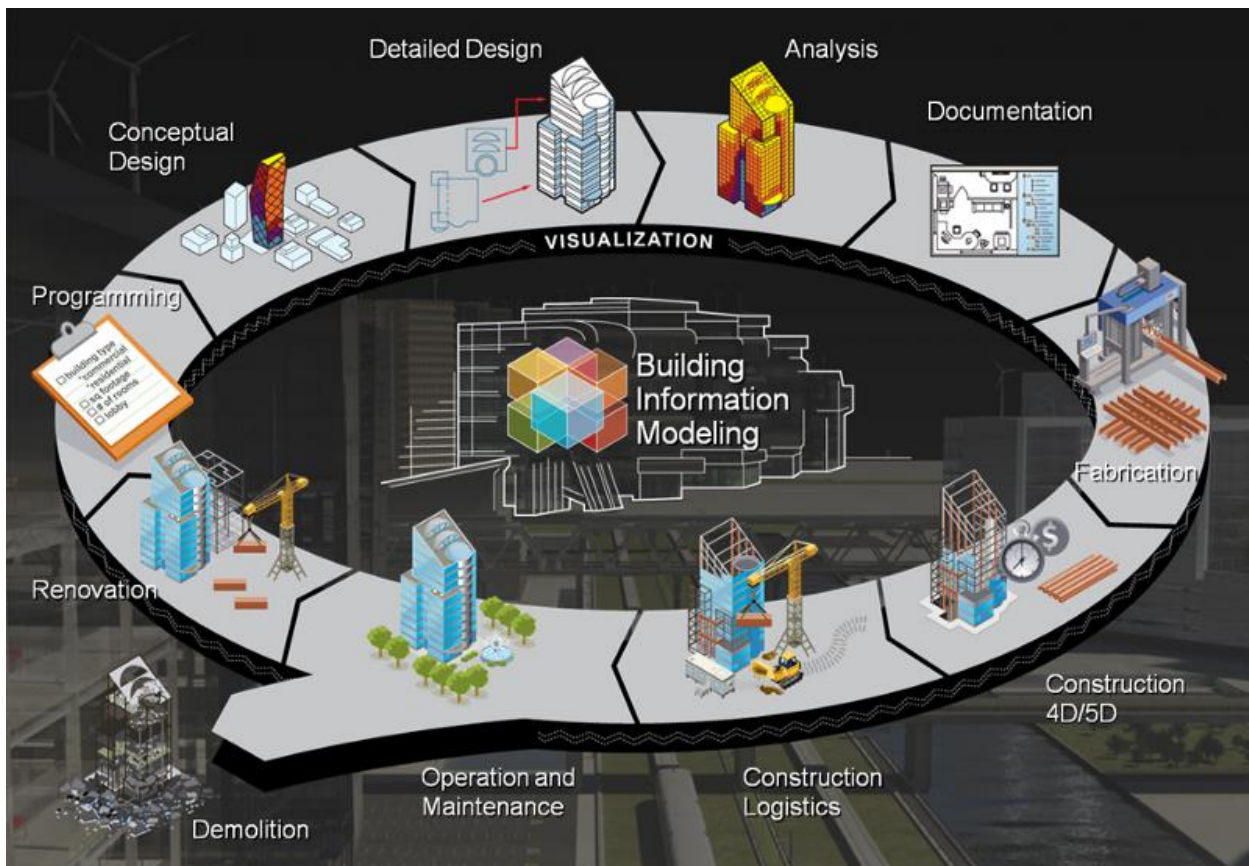


Figure I. 7 : Cycle de vie d'un bâtiment en BIM [2]

La figure ci-dessus illustre toutes les phases où le BIM intervient. Il permet de suivre la vie du bâtiment. C'est une véritable « carte d'identité ». Il constitue un historique des différentes opérations effectuées, modifications et réparations réalisées.

Un Autre avantage important est le coût de construction. De nombreux problèmes sur les chantiers sont liés à des changements effectués sur le plan et non communiqués, ce qui implique des adaptations ou dans le pire des cas des reconstructions. Le géomètre y est d'ailleurs confronté. Lors des chantiers de constructions, il est appelé à matérialiser différents éléments, notamment les fondations et les axes de murs. Les plans qui lui sont communiqués sont parfois des anciennes versions. L'intérêt du BIM manager est donc réel.

En évitant ces problèmes, certains spécialistes annoncent une économie allant jusqu'à 20% du coût de construction. Ces nouvelles méthodes intègrent une réduction des émissions de gaz à

effet de serre et du gaspillage, ainsi qu'une amélioration de la qualité des constructions. De plus, la meilleure gestion du planning permet d'éviter les attentes de certains corps de métier. Il s'agit de construire d'une manière raisonnée et écologique.

Le BIM doit permettre également une meilleure réflexion préalable du projet pour anticiper d'éventuels problèmes. L'avantage indéniable du BIM est de pouvoir construire avant de construire. Le DOE sera alors conforme au bâtiment tel que construit si la maquette numérique 3D intelligente est renseignée pendant la construction. La qualité des ouvrages réalisés et leur traçabilité s'en trouve grandement améliorée. [25]

❖ Les Avantages du BIM

Les avantages de la conception BIM sont multiples, pour tous les intervenants et à toutes les étapes d'un projet. Le BIM change la façon de travailler des maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs et entrepreneurs. Il leur permet de collaborer et d'ajouter des informations pertinentes très tôt dans le projet, lorsque les modifications n'ont pas encore de conséquences financières graves.

Grâce à la réalisation d'un prototype ou une représentation virtuelle de ce qui va être construit, le BIM permet à un bâtiment d'être construit, testé et analysé en temps réel avant même le premier coup de pioche.

Grâce au BIM, il est possible de réaliser des bâtiments qui consomment moins d'électricité, sont chauffés et climatisés plus efficacement, et protègent mieux leurs occupants.

Répartie en différentes catégories, voici la liste des principaux bénéfices liés à une conception BIM. [6]

✚ Avantages pour les maîtres d'ouvrage et les développeurs

- Durant les études de faisabilité et la conception, l'extraction des quantités du modèle virtuel BIM permet de vérifier très tôt si un projet respectera les critères financiers et les délais de construction.
- Le modèle virtuel 3D aide à la vérification des critères fonctionnels et environnementaux d'un projet. Il en découle une amélioration de la qualité des bâtiments. Cela est primordial quand on sait que l'utilisation d'un bâtiment représente 80% du coût total d'un bâtiment, y compris sa construction.
- Une meilleure collaboration entre les intervenants permet une meilleure compréhension des critères du projet

- Une estimation du coût en temps réel permet de vérifier immédiatement les incidences budgétaires des modifications de conception. [6]

Avantages pour les bureaux d'études, architectes et ingénieurs

- Le modèle virtuel 3D conçu avec un logiciel BIM permet d'effectuer des visualisations précises à toutes les étapes du projet, et est automatiquement consistant dans toutes les vues.
- Le modèle composé d'objets paramétriques ne comportera pas d'erreur de géométrie, notamment suite à une modification.
- Les logiciels BIM permettent à tout instant de générer des plans 2D, consistants entre eux, qui reflètent parfaitement le modèle virtuel à cet instant.
- La collaboration entre les intervenants est facilitée grâce à l'utilisation d'un même modèle 3D, simultanément ou non.
- Le modèle virtuel BIM permet la vérification du respect des normes en vigueur et des critères du projet tant au niveau quantitatif que qualitatif.
- Les quantités et coûts de construction peuvent être extraits en temps réel, à tout moment durant la conception. Cela permet d'avoir un retour immédiat sur les conséquences budgétaires d'une modification ou d'une variante.
- Les analyses et simulations des performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment peuvent être réalisées très tôt dans l'étude, ce qui fournit l'opportunité de corriger la conception au besoin. [6]

Avantages lors de la construction et la fabrication, entrepreneurs et fabricants

- Le modèle 3D est la source de tous les dessins, ce qui permet donc d'éliminer toutes inconsistances entre eux.
- Découverte des erreurs et omissions avant le début des travaux. Les modèles provenant de toutes les disciplines peuvent être assemblés et vérifiés pour les éventuelles interférences. Les conflits et autres problèmes de construction sont visualisés au stade des études et non sur le chantier.
- Grâce aux objets paramétriques du modèle virtuel, les modifications seront reportées en temps réel et leurs conséquences peuvent être visualisées.
- La conception et la construction peuvent être synchronisées grâce au 4D, qui ajoute la dimension temps au modèle virtuel 3D.

- Le modèle 3D permet l'extraction de tous les matériaux et ressources nécessaires à chaque étape du projet. Il est beaucoup plus facile de planifier les livraisons des matériaux et des équipements. Les commandes aux sous-traitants peuvent être effectuées avec plus de précision et en temps opportun.
- Le modèle 3D permet une plus grande précision de fabrication. [6]

❖ Les inconvénients de BIM

Maintenant, parlons des inconvénients. Ou plutôt, je vais parler de freins, car l'adoption du BIM se fera quoi qu'il arrive, mais cela va poser de nombreux problèmes qui vont jalonner toutes les étapes de la démocratisation du BIM à grande échelle. Je classe ces freins en 2 catégories

- Premièrement : les conséquences liées à l'adoption du processus et les craintes ou réticences qu'elles occasionnent.
- secondement : les difficultés d'implémentation du BIM qui risquent de mettre à mal la crédibilité du processus et de mettre à mal son adoption. [13]

I.4 Les Travaux topographiques

La topographie est la technique qui a pour objet l'exécution, l'exploitation et le contrôle des observations concernant la position planimétrique et altimétrique, la forme, les dimensions et l'identification des éléments concrets, fixes et durables, existant à la surface du sol à un moment donné . Les travaux topographiques peuvent être classés en six grandes catégories suivant l'ordre chronologique de leur exécution. [7]

I.4.1 Le levé topographique

C'est l'ensemble des opérations destinées à recueillir sur le terrain les éléments nécessaires à l'établissement d'un plan ou d'une carte. [7]

Afin de représenter les détails localisés sur un champ ou un terrain donné, l'expert va associer deux opérations, qui sont le lever altimétrique et le lever planimétrique, permettant de situer chaque point suivant trois axes X, Y (plan) et Z (altitude). X, Y et Z va indiquer sur le papier la situation d'un point dans l'espace. Le travail consiste essentiellement à suivre un système de coordonnées cartésiennes. On évoque ainsi la planimétrie et l'altimétrie.

Les opérations levées topographiques se divisent en deux grandes catégories :

✓ **Le levé topographique altimétrique**

L'altimétrie détermine les mesures des altitudes et est également connue sous l'appellation de nivellement. On peut avoir cette mesure par le biais d'un GPS ou d'un altimètre. Elle concerne le traitement du relief du sol pour pouvoir le présenter sur des plans.

Un levé topographique altimétrique permet également, dans un déploiement inverse, de situer un lieu, un ouvrage ou un objet sur un terrain par son altitude. On peut notamment évoquer différents types de nivellement : trigonométrique, direct, barométrique, nivellement de points intermédiaires par rayonnement, etc.

✓ **Le levé topographique planimétrique**

La planimétrie mesure les figures géométriques des objets se trouvant sur un terrain pour ensuite les transcrire sur un plan horizontal. Le spécialiste va mesurer la distance horizontale, les angles horizontaux et les orientations.

I.4.2. Les calculs topométriques

La topométrie est l'art de représenter sur un plan la configuration d'un terrain, en utilisant uniquement des mesures géométriques régulières (pas de croquis, pas de dessin). Le mot Topo désigne le lieu et le mot métrie désigne mesure. Elle constitue l'élément fondamental de la topographie. [4]

Ils traitent numériquement les observations d'angles, de distances et de dénivelées, pour fournir les coordonnées rectangulaires planes : abscisse E, ordonnée N et les altitudes H des points du terrain, ainsi que les superficies ; en retour, les calculs topométriques exploitent ces valeurs pour déterminer les angles, distances, dénivelées non mesurées, afin de permettre notamment les implantations. [7]

I.4.3 Les dessins topographiques

L'échelle (E) d'un plan ou d'une carte est le rapport constant entre une distance mesurée sur

Le papier (P) et la distance homologe du terrain (T) : $\frac{P}{T} = \frac{1}{E}$.

On distingue trois types d'échelles :

- petite échelle : $100\ 000 \leq E$;
- moyenne échelle : $10\ 000 \leq E \leq 100\ 000$;

– grande échelle : $E < 10\,000$, en général $\frac{1}{5000}$, $\frac{1}{2000}$, $\frac{1}{1000}$, l'appellation « très grande échelle » s'appliquant plutôt au $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{50}$.

Un dessin topographique est la représentation conventionnelle du terrain à grande échelle.

Selon le mode de saisie des données et le mode de traitement numérique et graphique mis en œuvre, on peut distinguer trois types de plans :

- Le plan graphique, représentation obtenue en reportant les divers éléments descriptifs du terrain sur un support approprié quel que soit le mode d'établissement.
- Le plan numérique est le fichier informatique des coordonnées des points et des éléments descriptifs du terrain, quel que soit le mode d'établissement ; ce fichier autorise le dessin du plan à différentes échelles à l'aide de traceurs de dessin assisté par ordinateur (DAO), la précision, indépendante de l'échelle, étant au mieux celle de la saisie des données .
- Le plan numérisé est un plan numérique dont une partie des données provient d'un plan graphique.

L'appellation plan topographique s'applique généralement au plan qui représente les éléments planimétriques apparents, naturels ou artificiels, du terrain et porte la représentation conventionnelle de l'altimétrie. [7]

I.4.4 Les projets d'aménagement

Ce sont les projets qui modifient la planimétrie et l'altimétrie d'un terrain : aménagements fonciers, lotissements, tracés routiers et ferroviaires, gestion des eaux : drainage, irrigation, canaux, fossés,... etc. [4]

I.4.5 Les implantations

L'implantation est l'opération qui consiste à reporter sur le terrain, suivant les indications d'un plan, la position de bâtiments, d'axes ou de points isolés dans un but de construction ou de repérage. La plupart des tracés d'implantation sont constitués de droites, de courbes et de points isolés.

I.4.6. Le Suivi et contrôle des ouvrages

Une fois construits, les ouvrages d'art nécessitent souvent une auscultation à un intervalle de temps plus ou moins réguliers suivant leur destination : digues, ponts, affaissements,...etc. Les travaux topographiques correspondants débouchent sur les mesures des variations des

coordonnées (X, Y, Z) de points rigoureusement définis, suivies de traitement numérique divers constatant un état et prévoyant éventuellement une évolution. [4]

I.5 Les Systèmes de Coordonnées

La position d'un point dans l'espace peut être exprimée sous forme de coordonnées cartésiennes géocentriques, soit sous forme de coordonnées géographiques, soit en coordonnées planes. Ces coordonnées peuvent être utilisées, par exemple, comme intermédiaire lors de calculs de changements de systèmes géodésiques de références.

I.5.1. Coordonnées géocentriques

Cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) : sont exprimées selon les trois (3) axes d'un repère ayant son origine au centre des masses de la Terre Figure 1.8. Ces coordonnées peuvent être utilisées, par exemple, comme intermédiaire lors de calculs de changements de systèmes géodésiques de références. [4]

I.5.2. Coordonnées géographiques

Coordonnées géographiques : exprimées en degrés ou en grades le méridien d'origine est soit Greenwich soit Paris.

- La lettre grecque λ (lambda) désigne la longitude.
- La lettre grecque ϕ (phi) désigne la latitude.
- La lettre h correspond à la hauteur ellipsoïdale. [4]

Méridien Origine

Le méridien d'origine est la ligne de longitude qui passe par Greenwich, en Angle terre. Le méridien a la valeur de 0°

Hauteur ellipsoïdale

Cette valeur, qui correspond à une distance entre le point considéré et le pied de la normale à l'ellipsoïde, peut différer de l'altitude de plusieurs dizaines de mètres. Tous les systèmes de positionnement par satellites fournissent une hauteur ellipsoïdale et non une altitude. [4]

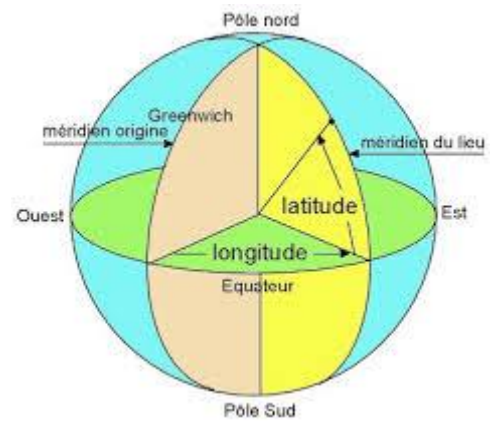
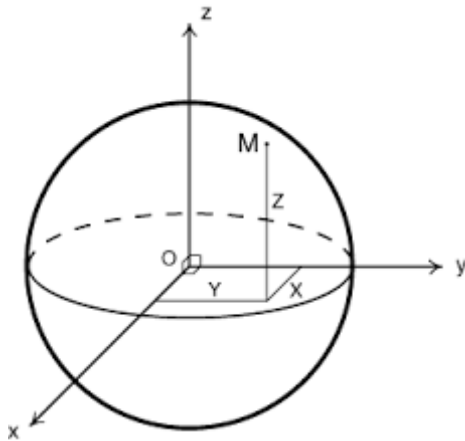


Figure1.8 : Coordonnées cartésiennes. **Figure1.9 :** Coordonnées géographiques de la Terre. [2]

I.5.3 Coordonnées plans E, N :

Les coordonnées planes sont issues de deux fonctions mathématiques qui, à tout point $M (\lambda, \varphi, h)$ de l'espace exprimé en fonction de l'ellipsoïde, associent un point M' (E, N) du plan. Chacune d'entre elles fait intervenir la latitude λ et la longitude φ , mais pas la hauteur ellipsoïdale h . La troisième dimension des coordonnées géographiques est ainsi perdue au cours de la transformation. Ces coordonnées sont donc bidimensionnelles, ce qui permet de les représenter sur un plan.

❖ Systèmes de projection

Les principaux systèmes de Projections sont :

- 1- Projections conique
- 2- Projections cylindrique
- 3-Projections azimutale (planar)

Les quelque 200 systèmes de projection peuvent être classés en 3 groupes :

- les systèmes conformes qui conservent les angles, ce sont les plus utilisés ; l'image d'un cercle reste un cercle dans le plan de projection.
- les systèmes équivalents qui conservent les superficies mais pas les angles ; l'image d'un cercle devient une ellipse de même aire.
- les systèmes équidistants qui conservent les distances à partir d'un point donné.
- les autres systèmes, encore appelés projections aphyllactiques, qui ne sont ni conformes ni équivalents. [7]

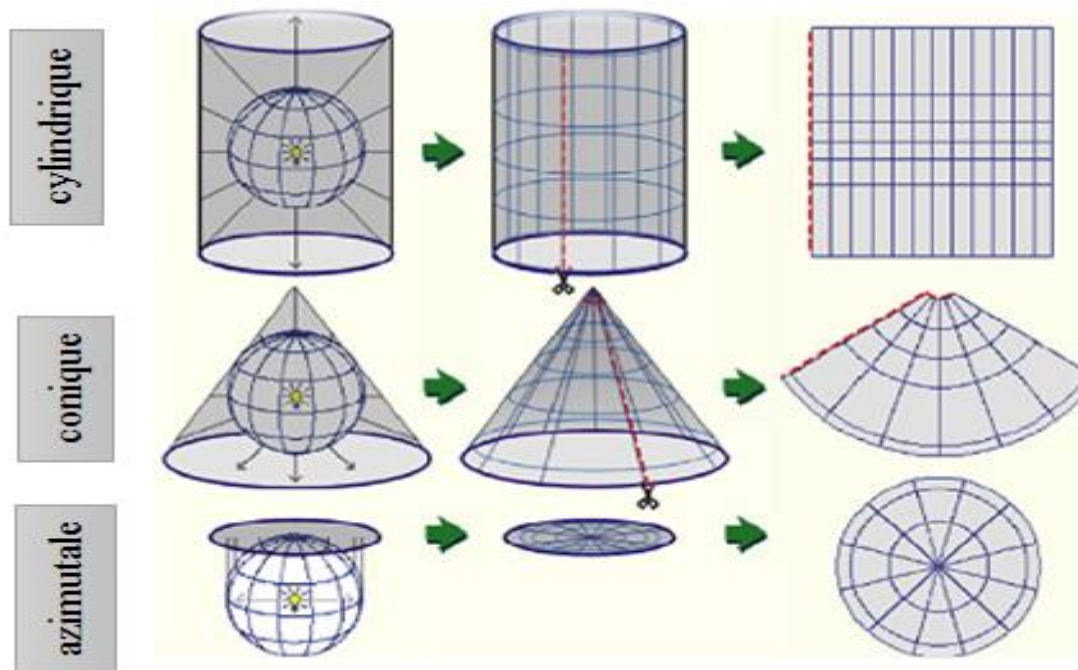


Figure 1.10 : Les 3 types de projection [2]

I.6 Les Mesures linéaires

I.6.1 Mesures des distances

Les procédés de mesures des distances peuvent être classés en deux catégories : Mesure Directe et Mesure Indirecte.

Une mesure est appelée directe lorsqu'on parcourt la ligne à mesurer en appliquant bout à bout un certain nombre de fois un étalon de mesure. L'étalon peut être rigide comme une règle ou souple comme un ruban.

Une mesure est indirecte lorsqu'on l'obtient sans avoir à parcourir la longueur à mesurer en comptant le nombre de fois qu'elle contient la longueur étalon. On utilise le procédé stadimétriques parallaxiques. [5]

I.6.2. Mesure directe des distances

Pour exécuter la mesure directe d'une distance, il existe plusieurs méthodes rapides et approximatives et d'autres rapides et précises :

- a- **le compteur kilométrique** : c'est un moyen permettant d'avoir rapidement et approximativement la distance entre deux points, mais cette distance est suivant le chemin parcouru et non horizontale. Il est utilisé surtout pour les travaux de reconnaissance.

b- Mesure au pas : c'est une méthode approximative pour évaluer des distances courtes et pour vérifier grossièrement le chaînage en cas de fautes

c- Mesure à la roue de reconnaissance : connaissant le rayon R de la roue et marquant un point de départ, on peut mesurer une distance entre deux points quelconques en comptant le nombre de tours de la roue.

$$\text{Distance} = n (\text{nombre de tours}) \times 2 \pi R (\text{circonférence de la roue})$$

Ce procédé donne d'assez bons résultats en terrain plat dégagé.

Cependant, le procédé le plus utilisé et le plus courant pour mesurer directement une distance est le chaînage qui est une opération importante (elle donne la distance sur le terrain) et délicate (introduction de fautes et d'erreurs dans les mesures). [4]

I.6.3. Mesure de distances à l'aide d'une chaîne

C'est le moyen le plus classique utilisé pour déterminer les distances. Ses inconvénients sont d'être tributaires du terrain (accidenté ou non, en forte pente ou non) ; et limité en portée. La précision de la mesure est également limitée et dépend fortement des opérateurs. Aujourd'hui, on utilise le décamètre, simple, double, triple ou quintuple. Le nom de chaîne ou ruban est devenue le terme général englobant le décamètre, le double décamètre, etc. Les rubans sont répartis en trois classes de précision : le tableau 1. en donne les tolérances de précision fixées par une norme Européenne CEE (Communauté Économique Européenne).

Tableau1 : Tolérances de précisions fixées par la norme européenne CEE.

	10M	20M	30M	50M	100M
Classe I	± 1,1 mm	± 2,1 mm	±3,1 mm	± 5,1 mm	
Classe II	± 2,3 mm	± 4,3 mm	±6,3 mm	±10,3 mm	±20,3 mm
Classe III	± 4,6 mm	± 8,6 mm	±12,6 mm	±20,6 mm	

Les valeurs du tableau étant des tolérances, si l'on veut obtenir l'écart type il suffit de diviser par 2,7. [4]

I.6.4 Mesure indirecte des distances

Une distance est indirecte lorsqu'elle est déterminée sans avoir à la parcourir avec un étalon. Elle résout le problème de mesurage sans déplacement de l'opérateur. C'est un procédé beaucoup plus rapide pour les grandes distances et il a surtout l'avantage de permettre des mesures en terrains accidentés ou impossible.

Les mesures s'effectuent soit avec des mesures stadimétriques, parallactiques ou électroniques. [4]

❖ Mesures stadimétriques

Elle permet la mesure indirecte d'une distance horizontale en lisant la longueur interceptée sur une mire par les fils stadimétriques du réticule de visée. au moyen d'un procédé optique, à l'aide d'un appareil (tachéomètre par exemple) et une mire (verticale ou horizontale).

La distance qui sépare ces deux instruments est déterminée en faisant la différence de lectures sur la mire multipliée par 100. [4]

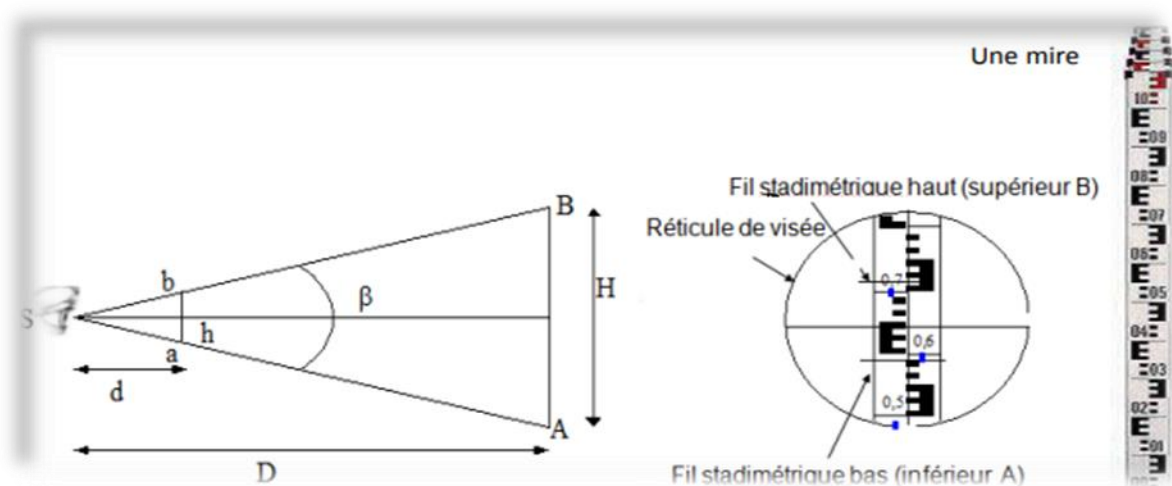


Figure 1.11 : Principe de mesure par stadimétrie. [4]

❖ Mesures Électroniques

Les instruments de mesure de longueurs (I M E L) ou appelés encore les instruments de mesure électronique des distances (I M E D) fonctionnent comme des chronomètres. Ils utilisent les ondes électromagnétiques qui se propagent en ligne droite, à une vitesse constante et connue.

L'intensité de l'onde porteuse est modulée à l'émission par une fréquence plus basse. L'onde porteuse est émise par un poste émetteur récepteur et renvoyée par celui-ci (Figure I.12), soit par un réflecteur, soit par un deuxième (ondes radio). Les I M E L mesurent en fait des temps de parcours.

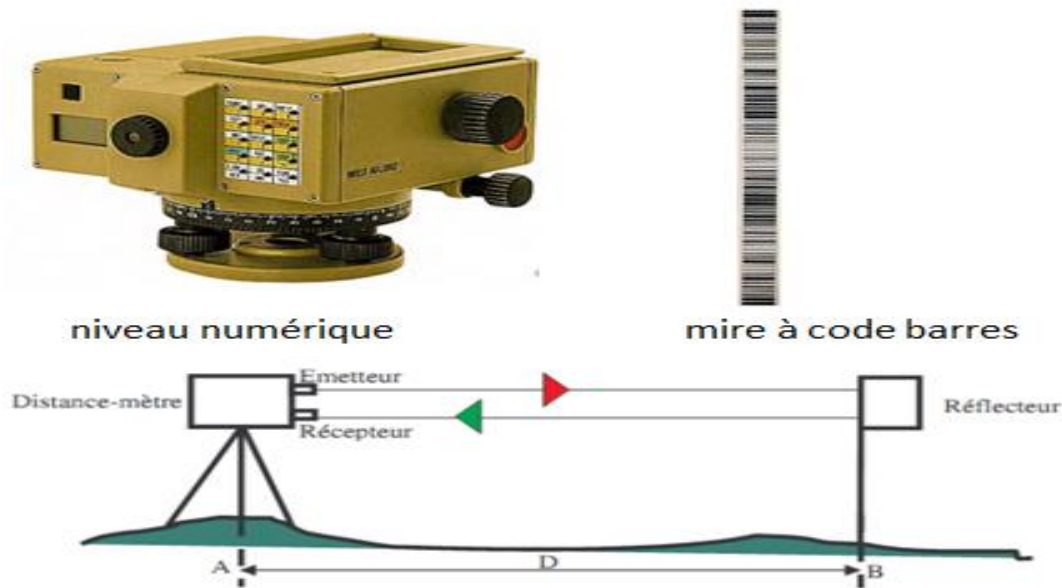


Figure I.12 : Un IMEL avec émetteur et récepteur.

Ces mesures sont effectuées grâce à des Instruments de Mesure Électronique des Longueurs (I M E L) qui utilisent les ondes électromagnétiques se propageant en ligne droite à une vitesse constante et connue. [4]

I.6.5 Les fautes et les erreurs

L'inexactitude d'une mesure quelconque est due à deux causes différentes : «l'erreur» ou «la faute».une définition Tous ces termes, bien que faisant partie du même champ sémantique, couvrent des notions différentes. [4]

❖ Les fautes

Un opérateur commet une faute quand, en ne faisant pas ce qu'il devrait, il provoque lui-même, involontairement ou non, une différence entre la valeur lue et la valeur vraie de la grandeur mesurée. Les fautes peuvent être souvent imputables à la maladresse, à la négligence, à un oubli, à l'incompétence ou à la mauvaise foi. La distinction entre ces causes, notamment entre les trois premières, est assez subtile. [4]

❖ Les erreurs

Les erreurs sont définies comme étant des petites inexactitudes dues aux imperfections des instruments et aux sens, et les erreurs sont impossibles à connaître exactement. Il convient de les classer en deux catégories :

- les erreurs systématiques
- Les erreurs accidentelles.

- L'erreur systématique : se répète et se cumule à chaque mesure. L'influence de ces erreurs peut souvent être évaluée par calcul, et prise en compte dans la détermination finale.

- L'erreur accidentelle : de valeur et de signe aléatoires, elle peut avoir diverses origines : défaut de calage de l'appareil à la mise en station, erreur de pointé, de lecture, des paramètres extérieurs non maîtrisables (température, hygrométrie...), erreur de réfraction accidentelle...

Sur une série de mesures (cheminement altimétrique, polygonal), l'influence des erreurs systématiques doit être minimisée par la méthode employée. Par contre, il reste les erreurs accidentelles qui sont généralement considérées comme les seules participant aux fermetures. [3]

I.7 Mesure des angles

I. 7.1 Les appareils de mesures angulaires

L'instrument le plus utilisé pour mesurer les angles est le théodolite (angle seulement) ou le tachéomètre (angle et distance) ou Station Totale (mesure indirecte des angles, des distances et des dénivelées)

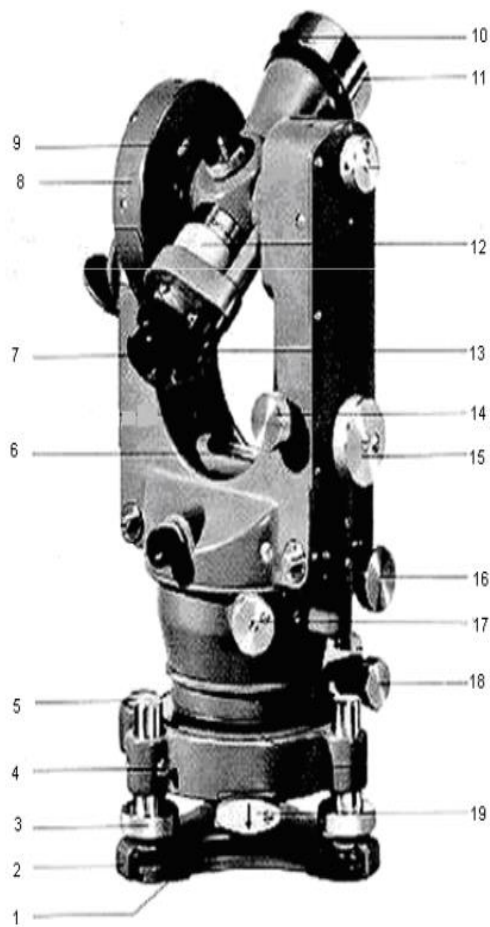
Le terme tachéomètre signifie « mesure rapide ». Un tachéomètre est par conséquent un « instrument de mesure rapide ». C'est un théodolite muni d'un distancemètre qui relève simultanément les angles et les distances.

Les tachéomètres électroniques modernes disposent tous d'un distancemètre électro-optique (EDM) et d'un système de saisie d'angles électroniques. Ce procédé assure un balayage de la division codée des cercles horizontal et vertical.

Les principales parties d'un théodolite sont :

- La lunette ;
- Les axes de rotation (optique, mécanique, des tourillons) ;
- Plateaux : inférieur (graduation), supérieur (repère, vernier) ;
- Vis de blocage ;
- Vis de rappel ;
- Vis calantes (3 en général);
- Fil à plomb ou plomb optique ;
- Cercles : horizontal (gradué de 0 à 360° ou 400 gr) et Vertical (gradué de 0 à 180° ou 200 gr) ;
- Nivelles : sphérique (fixé à l'embase), horizontale (tube en verre ou nivelle du maçon) et verticale (pour les angles verticaux). [5]

Tableau 2 : Nom de l'élément Théodolite



1	Plaque de translation	11	objectif
2	socle	12	Mise au point sur la distance
3	Vis calante	13	Loupe de lecture du cercle vertical
4	Vis de fin mouvement du cercle horizontal	14	Vis de fin mouvement du cercle vertical
5	Écrou de réglage	15	vernier
6	Bulle sphérique	16	Fin mouvement en azimut
7	oculaire	17	Blocage du cercle horizontal
8	Cercle horizontal	18	Vis de blocage du cercle horizontal
9	Cercle horizontal	19	Ressort de translation
10	Viseur extérieur		

Figure I.13 : Théodolite ZEISS T1 [2]

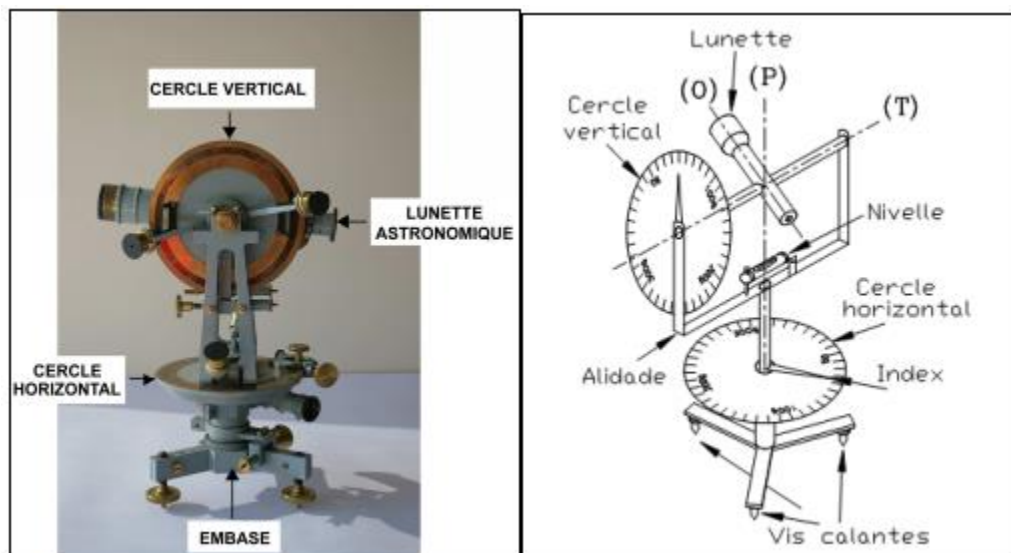


Figure I.14 : Schéma de principe d'un théodolite. [2]

I.7.2 Le type d'angles

❖ Les angles verticaux ou zénithaux

Ce sont les angles mesurés entre la verticale de la station (le zénith) et la direction d'une autre station.

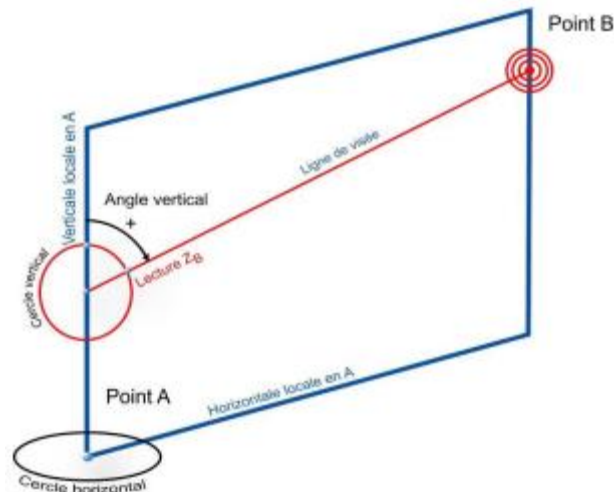


Figure I.15 : Angle vertical. [4]

❖ Les angles horizontaux ou azimutaux

Ce sont les angles dièdres mesurés entre deux plans verticaux. L'angle horizontal est la différence entre deux lectures effectuées sur deux directions (lecture finale – lecture initiale).[5]

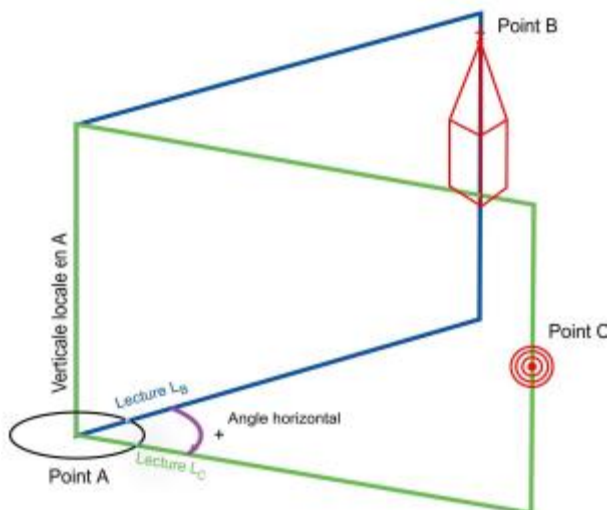


Figure I.16 : Angle horizontal. [4]

I.8 Le nivellement

Le nivellement est l'ensemble des opérations qui permettent de déterminer des altitudes et des dénivelées.

L'altitude d'un point est la distance en mètre par rapport à une surface de niveau zéro.

Le nivellement peut s'effectuer selon deux procédés qui sont par ordre de précision décroissant :

- le nivellement direct ou géométrique.
- le nivellement indirect ou trigonométrique.

I.8.1 Nivellement direct ou géométrique

Les méthodes de nivellement direct constituent l'arsenal le plus efficace pour déterminer l'altitude de points particuliers. La précision des déterminations dépend du matériel employé. Les niveaux sont classés en trois catégories dont chacune correspond à des besoins différents, et à des méthodes appropriées.

- Nivellement par rayonnement
- Nivellement d'itinéraires par cheminement
- Nivellement de franchissement

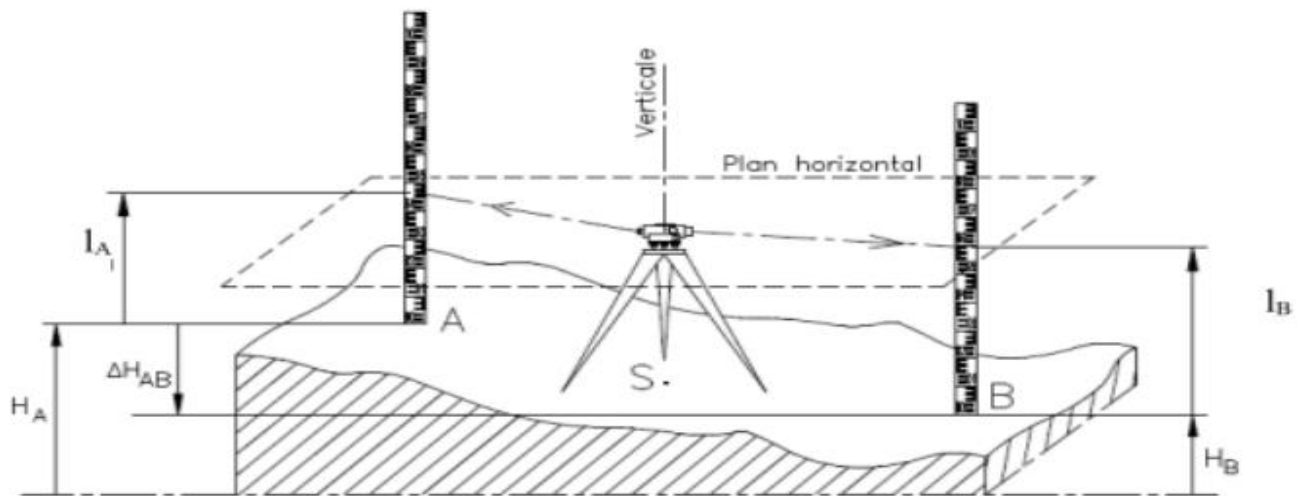


Figure I.17 : Nivellement direct [2]

I.8.2 Nivellement indirect ou trigonométrique

Le nivellement trigonométrique est réalisé par calcul de la dénivelée à partir de la distance oblique entre les points, et l'angle zénithal. Le principe général est explicité par la figure ci-dessous. [10]

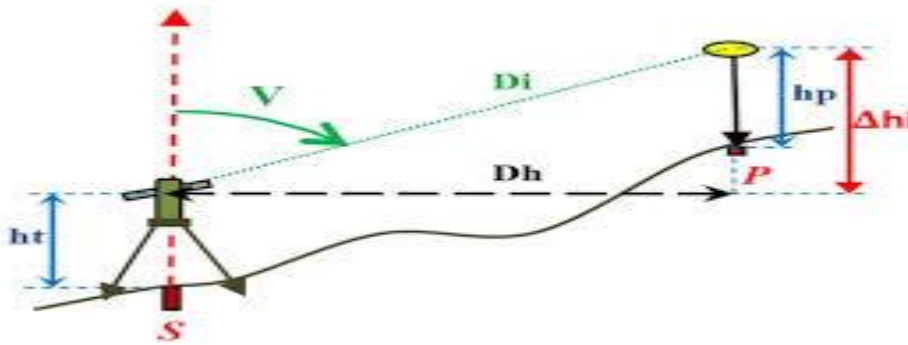


Figure I.18 : Nivellement indirect [2]

I.9 Le technologie laser scanner3D

I.9.1 Historique

❖ À propos de l'usage du Scanner 3D dans la santé & dans l'Industrie

L'usage du premier scanner 3D à « rayons X » pour l'imagerie médicale remonte à 1972. L'ingénieur britannique Godfrey N. Hounsfield révolutionne par son invention l'exploration humaine dans le domaine de la santé et rend médicalement accessible, la représentation intérieure en trois dimensions d'un corps humain.

Une quinzaine d'années plus tard, commence à se développer la technologie du scanner laser 3D avec dans les années 1990, l'arrivée et la commercialisation des tous premiers appareils MMT pour l'industrie et plus particulièrement dans le secteur du nucléaire pour la prise de mesures à distance. Dans l'industrie automobile ou dans la mécanique ce dernier facilite en fabrication, le contrôle qualité des pièces à assembler.

Dans les années 2000 le scanner « laser » 3D fait son apparition dans l'industrie pétrolière. La société TOTAL en Argentine, sur son champ offshore de Terre de Feu, en fait usage pour cartographier des réseaux de tuyauterie bâtis au fil des ans et dont elle n'avait pas de plan « As built ».

Progressivement l'usage du scanner 3D s'étend à d'autres applications, dans des secteurs de plus en plus diversifiés, comme par exemple le relevé d'empreintes pour la réalisation de prothèses dentaires ou encore en rétro-ingénierie, dans l'assurance qualité ou dans la prévention des risques. Mais on retrouve aussi son usage pour la modélisation CAO de pièces de mécanique à fraiser, ou encore pour la conservation du patrimoine culturel en complément de la photogrammétrie. Utilisé pour la création de modèles et décors en animation, le scanner 3D fait son apparition également dans l'industrie du cinéma ou des jeux vidéo.

Avec le développement de l'usage du scanner laser 3D dans l'industrie, apparaît également la nécessité de développer des logiciels capables d'intégrer des outils de visualisation de nuages de points pour la modélisation en CAO et d'en traiter les données. [9]

❖ À propos de l'usage du Scanner 3D dans le Bâtiment

Avec l'arrivée du BIM, le secteur du bâtiment se lance dans sa propre révolution numérique en s'inspirant de celle vécue précédemment par l'industrie et tente de s'approprier certaines techniques mises au point et approuvées par sa grande sœur durant ces trois dernières décennies. Après avoir adopté les méthodes informatisées de dessin industriel en 2D, le bâtiment se met lui aussi progressivement à la 3D, puis à la CAO et complète sa palette d'outils numériques avec notamment, le laser 3D, appelé couramment « Disto » (du nom de sa marque) sur le chantier. L'appareil photo numérique remplace progressivement l'argentique et le masque de réalité virtuelle donne aux architectes les moyens d'immerger virtuellement leurs clients dans leurs projets de construction. À l'heure où l'imprimante 3D prend place à côté du traceur dans nos agences d'architecture, le scanner laser 3D s'impose lui aussi dans notre secteur comme l'outil de référence pour le relevé de bâtiment existant.

Mais, si ce dernier a fait ses preuves dans l'industrie il n'apporte à ce jour qu'une réponse partielle à la problématique de modélisation BIM.

La reconstruction de forme à partir d'un nuage de points aboutit à un maillage 3D. La modélisation se fait en général à partir des algorithmes de reconstruction du logiciel de posttraitement des données du scanner et non dans le logiciel de conception architecturale assistée par ordinateur.

Le modèle final importé dans les logiciels de CAO arrive donc la plupart du temps dans les solutions métiers dépourvu d'intelligence architecturale.

Quelles sont donc à ce jour les différentes techniques possibles de reconstruction virtuelle d'un modèle architectural à partir d'un nuage de points ?

Comment passe-t-on du point 3D à la maquette numérique, et quel travail cela implique-t-il ?

Quelles sont les différentes étapes à franchir ?

En quoi les solutions logicielles proposées à ce jour sur le marché sont-elles limitées ?

Autant de questions développées ici, en partant d'un état de l'art à ce jour sur le sujet.

A l'heure où les enjeux environnementaux sont primordiaux pour la survie de notre planète et où nous devons relever des défis économiques considérables dans notre secteur, nous sommes en

droit de nous poser la question suivante : « Sommes-nous en capacité d'imaginer aujourd'hui d'autres alternatives « Métier » pour le secteur du bâtiment en matière de modélisation à partir d'un nuage de points, et plus particulièrement pour l'« Architecture » en vue d'une « Gestion de Patrimoine » et/ou d'« Analyse de Performance Energétique » de Bâti ? [9]

I.9.2 Définition scanné 3D

Les sont aussi appelés scanner tridimensionnel, ce sont des appareils de numérisation et d'acquisition 3D.

Un scanner tridimensionnel est un appareil qui analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture...) de ceux-ci. Les données ainsi collectées peuvent alors être utilisées pour construire des images de synthèse en trois dimensions à des fins diverses. Ces appareils sont beaucoup utilisés par les industries du divertissement pour des films ou des jeux vidéo et maintenant dans le domaine du bâtiment.

I.9.3 Levé topographique : Quel objectif ?

Objectif levé topographique l'établissement de plan ou de carte sur la base d'informations recueillies sur le terrain et portant sur tous les éléments naturels ou artificiels le constituant. Il se fait essentiellement par la mesure d'angles topographiques, horizontaux et verticaux, et de distances, permettant d'accéder aux éléments de planimétrie et d'altimétrie, donc sur la base de l'utilisation d'un tachéomètre positionné en station. Effectuer un levé topographique consiste donc au départ de ce point de station en la réalisation d'une série de mesures.

Préalablement à ces relevés de mesure, il est fondamental de procéder à l'orientation du levé. Cette opération s'effectue soit par la création d'un système local de coordonnées en fixant une orientation de référence, soit par intégration dans un système général existant.

L'étape suivante est l'établissement du canevas. Les trois méthodes employées sont passées en revue avec leurs principes et spécificités ; la triangulation avec détermination des intersections et des relèvements, la multilatération centrée sur les mesures de distance et la polygonalement définie par des angles aux sommets et par des distances entre sommets.

Le levé des détails peut alors être conduit, conformément à la précision attendue. La méthode la plus courante est la détermination des points par rayonnement à partir d'une ligne d'opération orientée, mais il est souvent nécessaire de faire appel à d'autres méthodes, comme le levé à équerre optique ou la méthode de la quasi-hauteur, du recoupement ou du rabattement. Les éléments à implanter sont généralement des points et des directions. L'implantation des figures

complexes se fait en décomposant celles-ci en éléments géométriques simples : segments de droites, arcs de cercles, courbes avec variation régulière du rayon de courbure. Des exemples précis accompagnés de schémas explicatifs sont fournis dans le cas pour d'implantation d'un point connu par ses coordonnées, d'une parcelle existante, de courbes, de canalisation...

Une fois le levé terminé, les données stockées dans l'appareil sont transférées dans un ordinateur. [20]

I.9.4 La solution du scanner laser 3D

Le levé à l'aide d'un laser 3D est apparu comme étant la solution la plus pertinente au vu de ces performances, rapidité d'exécution, précision, rendu de l'information et de son traitement, pour un coût raisonnable. Encore peu mise en œuvre en France. D'autre part, cette technique est d'autant plus intéressante qu'elle se marie parfaitement avec des sondages bathymétriques multi-faisceaux. En effet, le format des données produites par un Scanner 3D est similaire à celui d'une campagne de levé bathymétrique. Si les deux acquisitions sont réalisées dans le même système de coordonnées, leur fusion est automatique et permet une vue très précise de l'ouvrage dans sa globalité et dans son environnement. [8]

I.9.5 Le levé lasergrammétrique

❖ La technologie

La lasergrammétrie, ou levé scanner laser 3D, est une nouvelle technologie qui bouleverse les méthodes de relevé. Elle utilise une nouvelle génération d'instruments de mesure, les scanners 3D, capables d'enregistrer plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes, avec une précision de quelques millimètres et une portée dépassant pour certains plusieurs centaines de mètres. Le bond technologique réside dans la capacité de ce type d'appareil à collecter un très grand nombre d'informations très rapidement et à distance. [8]



Figure I.19 : Le scanner 3D Leica BLK360 numérisant Bâtiment

Le résultat d'une opération de numérisation est avant tout un fichier numérique contenant une série de coordonnées géométriques (X, Y, Z), constituant ce qu'on appelle un « nuage de points » 3D. Selon les besoins exprimés, le traitement des nuages de points sera différent. Il nécessite

toujours l'utilisation de logiciels spécifiques, développés exclusivement pour la gestion de données 3D denses. [8]

I.9.6 La différence et Similarité du levé topographique et le scanner 3D

Tableau 3 : La Différence et similitude du levé topographique et le scanner 3D

Similarité	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ils permettent de numériser ➤ Les deux contiennent un petit et compact, et peut être transporté dans un Boîte de sécurité. ➤ Collecte et sauvegarde les informations requises dans un délai spécifié terminer les projets rapidement et à temps ➤ Obtenez des points de nuage précis et denses ➤ Transférer facilement les données stockées dans l'appareil vers l'ordinateur ➤ Ils peuvent tous deux mesurer des distances, des angles et des hauteurs ➤ Ils permettent une vue très précise et totale de la structure 	
différenc	<p>Le scanner3D</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Enregistrez des millions de points en quelques minutes ➤ Fonctionnement simple à un bouton ➤ Enregistrement de terrain automatisé à l'aide de Cyclone FIELD 360 ➤ Mesurez jusqu'à 2 millions de points par seconde ➤ Contiennent des coordonnées géométriques tridimensionnelles (x.y.z) ➤ La possibilité de connaître la température de la structure du bâtiment des objets dans leur ensemble ➤ Possibilité de calculer le volume ➤ La possibilité d'utiliser la batterie pendant 4 heures ➤ Le champ de vision s'étend jusqu'à plusieurs mètres ➤ Capturer la réalité 	<p>Levé topographique</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ C'est un processus simple en appuyant sur plusieurs boutons ➤ contiennent de coordonnées géométriques 2d (x.y) ➤ La possibilité d'utiliser la batterie pendant 8 heures ➤ Le champ de vision s'étend jusqu'à plusieurs 1km

I.9.7 Les outils

❖ Type scanner3D

• Leica BLK360

Le Leica BLK360 capture l'environnement avec des images panoramiques colorisées recouvertes par un nuage de points très précis. Simple d'utilisation avec une seule pression sur un bouton, le BLK360 est le plus petit et léger des scanners.

En utilisant le logiciel Leica Cyclone FIELD 360 ou l'application mobile Autodesk ReCap Pro, le BLK360 transmet les données d'image et de nuages de points à un iPad ou les données finales du projet à Cyclone REGISTER 360 via Wi-Fi. [14]



Figure I.20 : Le Leica BLK360

✚ Les Caractéristiques

Tableau 4 : Caractéristiques Leica BLK360 [16]

Portée	0.6m à 60m
Précision	4mm à 10m (portée)
Vitesse de numérisation	360 000 points/sec.
Champ visuel	360° (horizontal) / 300° (vertical)
Imagerie	15.1 Mpixel HDR, LED flash sphérique, thermographique
Protection	IP54
Température d'utilisation	+5°C @ +40°C
Alimentation	Batterie Li-Ion
Dimension / poids	165mm (H) x 100mm (D) / 1kg.

✚ Les Détails

Le kit de mission BLK360 se compose de :

- ✓ 1 Sacoche de transport pour le BLK360. La sacoche de transport contient des compartiments pratiques pour le BLK360 et ses accessoires, y compris une pochette pour l'iPad Pro. Elle est également rembourrée pour une protection supplémentaire.
- ✓ 2 Batterie-Lithium-Ion-GEB212
- ✓ 1 Chargeur de batterie GKL312
- ✓ 1 Trépied pour le BLK360. Le trépied pliant plat BLK360 comprend un adaptateur à fixation rapide. [15]

✚ Leica BLK360 Scanner laser avec imagerie

- Vous permet de numériser rapidement et en haute résolution
- Poids 1kg / taille 165mm de long et 100 mm de diamètre
- Moins de 3 minutes pour un scan complet de dôme (en résolution standard) et 150MP d'image sphérique.
- Laser scan de 360.000 points à la seconde
- Image HDR et thermique [14]

• Laser RTC 360

Le laser RTC 360 est la nouvelle solution pour capturer et documenter votre environnement en 3D. Il est petit et compact, et peut être transporté dans un sac à dos. C'est le laser idéal pour les professionnels travaillant sur des projets complexes nécessitant des représentations 3D précises et fiables quelles que soient les conditions sur le site. Il détient un taux de mesure de 2 millions de points par seconde et crée des nuages de points 3D colorés en moins de 2 minutes. Le RTC 360 permet, avec la solution Leica Cyclone FIELD 360, d'intégrer vos modèles 3D dans votre travail. Le laser RTC 360 se distingue par son enregistrement automatique des positions en temps réel sur le terrain, et ce, sans cibles. Il aligne instinctivement les scans, ce qui permet une grande rapidité lors de vos projets. Il est possible d'ajouter des marqueurs et des balises à vos projets pour une meilleure planification. [17]



Figure I.21 : Le scanner 3D Laser RTC 360

Les détails

- ✓ Mesurez jusqu'à 2 millions de points par seconde
- ✓ Nuages de points 3D colorés
- ✓ Analyse complète en moins de 3 minutes
- ✓ Petit et léger
- ✓ Fonctionnement simple à un bouton
- ✓ Enregistrement de terrain automatisé à l'aide de Cyclone FIELD 360[19]

Les Caractéristiques

Tableau 5 : Caractéristiques Laser RTC 360[17]

Portée	0.5m à 130m
Précision	1.0mm
Précision angulaire	18"
Vitesse de numérisation	2 000 000 points / sec
Imagerie	HDR
Protection	IP54
T° utilisation	-5°C à +40°C
Dimension / poids	120 mm x 240 mm x 230 mm/ 5.35 kg
Alimentation	2x Batterie Li-Ion rechargeable GEB361 (jusqu'à 4 heures)

- **Leica P40**

Les Scan Station Leica P40 délivrent une haute qualité de données 3D et une imagerie HDR à une très grande vitesse de numérisation de 1 million de points par seconde à des portées allant jusqu'à 270 m. Les nuages de points 3D produits en couleurs sont détaillés et photo-réalistes. Ces rendus sont dus à une longue portée combinée à une précision angulaire, à un bruit de mesure très faible et à l'utilisation d'un compensateur bi-axial intégré. [18]



Figure I.22 : Les Scan Station P40

- ✚ **Les Caractéristiques principales des Scan Station P40 :**

- ✓ Vitesse de numérisation extrêmement élevée de 1 million de points par seconde
- ✓ Portées allant jusqu'à 270 m
- ✓ Protection : IP54
- ✓ Température d'utilisation: -20°C @ +50°C
- ✓ Haute qualité de données 3D et d'imagerie HDR
- ✓ Bruit de mesure très faible
- ✓ Compensateur bi-axial intégré
- ✓ Nuages de points 3D produits en couleurs détaillés et photo-réalistes. [18]

- ❖ **Types de levés topographiques**

- **Leica iCON robot 60**

La nouvelle station robotisée Leica iCON robot 60 facilite la transition numérique, aidant à passer des méthodes analogues traditionnelles à des méthodes d'implantation numériques. Ces nouvelles méthodes sont indispensables au processus BIM et permettent d'atteindre une productivité et une précision maximales requis par l'industrie de la Construction. [22]

Le Leica iCON robot 60 est conçu pour gérer tous chantiers de construction et est aussi optimisé pour le positionnement 3D contrôle de machine. Polyvalent et très efficace, il permet un

retour rapide sur investissement. Offrent plusieurs caractéristiques uniques pour réaliser travaux rapidement, précisément et facilement. [23]



Figure I.23 : Le Leica iCON robot 60

✚ Les Caractéristiques principales Leica iCON robot 60

Tableau 6 : Caractéristiques Leica iCON robot 60

Caractéristiques technique	Leica iCON robot 60
Grossissement	30X
Précision	5", 2", 1"
Plage de mise au point	De 1.75 à l'infini
Mesure de distance	Infrarouge (IR) Laser (RL)
Portée prisme	3500m
Portée Cible	250m
Portée sans réflecteur	250m
Plomb laser	1.5mm à 1.5m
Poids	5.9Kg
Protection	IP56
Température de travail	-20 °C à +50 °C / -40 °C à +70 °C

CHAPITRE II :
EXPLOITATION ET TRAITEMENT
DES DONNÉES 3D

II.1 Introduction

Le monde du bâtiment et des travaux publics connaît des évolutions majeures depuis quelques années. Notamment avec l'intégration d'outils numériques pour la conception et la réalisation des ouvrages. Dans le but d'améliorer la gestion des projets, Les techniques de mesures 3D sont mises en place à travers l'utilisation d'un scanner laser 3D. L'exhaustivité et la précision des données collectées permettent de constituer une base solide et complète pour procéder à la modélisation de bâtiments.

L'acquisition des données 3D et l'assemblage des scans sont des éléments parfaitement maîtrisés. Le but de ces relevés est bien entendu la création de plans 2D ou 3D. Actuellement, le service réalise les plans avec le logiciel AutoCad de la firme Autodesk à partir d'une coupe du bâtiment relevé. Le dessin ou la modélisation passe donc par la 2D. Il s'agit d'une étape longue et fastidieuse. De plus, les données issues du scanner laser sont peu utilisées. En effet, les informations d'intensité, les photos prises lors du relevé ou encore le nuage de points intervient seulement lorsque l'interprétation sur l'orthophoto est difficile. Dans le but de réduire au maximum cette étape fastidieuse que constitue la modélisation à partir d'un nuage de points, CBT cherche un moyen d'automatiser cette étape ou tout du moins, de la simplifier.

Nous verrons donc dans partie quel est les différents outils disponibles pour l'exploitation de données 3D, les logiciels de traitement de nuage de points ainsi que les logiciels de modélisation. Suite à cette étude, des choix logiciels seront effectués. D'automatisation disponible dans ces derniers. Le développement de la solution d'automatisation développée à travers son algorithme et son intégration dans un logiciel de modélisation. [25]

II.2. Scanner laser terrestre

Le scanner laser terrestre est utilisé aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de bâtiments. Il s'agit d'une technique très répandue pour la modélisation de bâtiments existants qui est adoptée progressivement par l'industrie du bâtiment et dans le domaine de la documentation du patrimoine (Stylianidis et Remondino, 2016). Cette technique permet en effet des levés rapides de l'existant, très précis, et avec un niveau de détails élevé (Azhar et al., 2012; Gao et al., 2012; Li et al., 2008). Certains gouvernements tels que les gouvernements britannique et américain recommandent l'utilisation de cette technologie de capture dans le processus BIM.

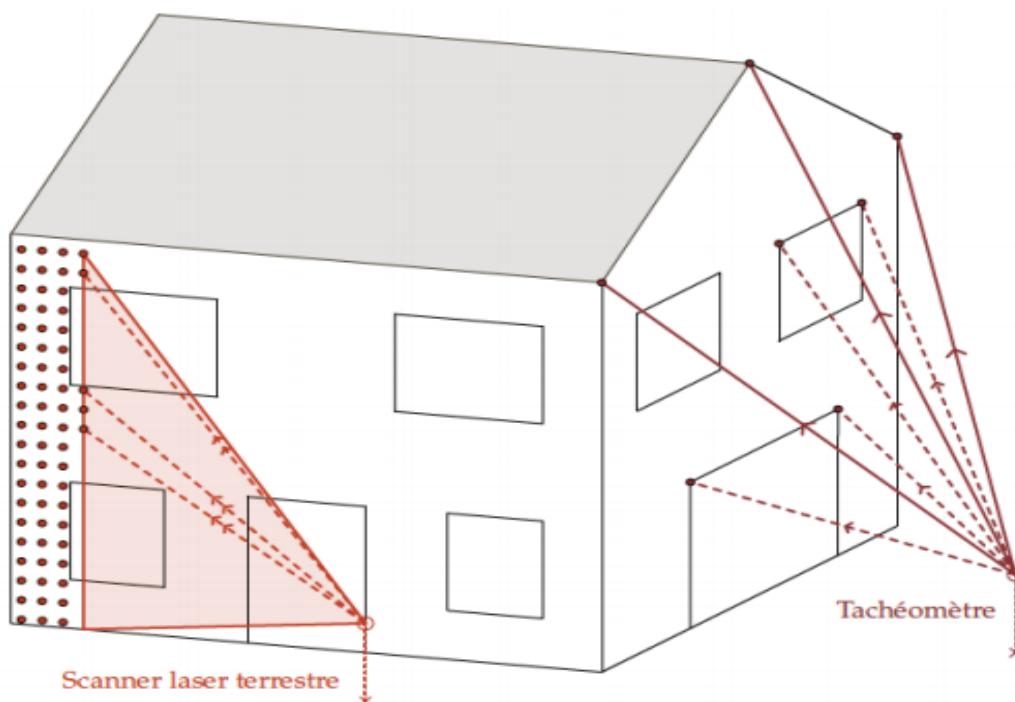


Figure II.1 : Acquisition de façade au scanner laser et au tachéomètre sans réflecteur [28]

Le balayage laser terrestre est une technique d'acquisition qui utilise la lumière laser. Elle permet de mesurer, de manière rapide et sans contact, un objet selon une trame régulière de points. Elle fournit les coordonnées tridimensionnelles des points décrivant les surfaces présentes dans la scène considérée. L'ensemble de ces points est appelé nuage de points. [28]

II.3 Techniques 3d surfaciques

L'information ponctuelle tirée des techniques classiques peut s'avérer insuffisante pour le suivi d'ouvrages non monolithiques comme les bâtiments par exemple, pour lesquels la probabilité de détection d'un défaut est directement liée à la densité des points mesurés sur l'ouvrage. Les nouvelles techniques dites "surfaciques", car permettant l'acquisition d'une très

grande densité de points sur la surface de l'ouvrage, peuvent alors compléter les dispositifs d'auscultation classiques. Deux de ces techniques :

- 1- lasergrammétrie.
- 2- la photogrammétrie numérique. [20]

II.3.1 Le LiDAR

Cette technique permet d'acquérir rapidement et avec une résolution très fine des données 3D sous forme de nuages de points. Elle exploite la technologie des lasers scanners 3D dont la mesure polaire par balayage rapide permet le relevé de millions de points en quelques minutes. Le scanner réalise une mesure sans réflecteur directement sur la surface de l'ouvrage et non pas sur des repères identifiés, remarque importante en auscultation lorsqu'il s'agit de comparer des relevés et analyser les déformations.



Figure II.2 : Scanner laser 3D en station pour le relevé terrestre

Il faut différencier son utilisation en mode statique (terrestre) et en mode dynamique (embarqué sur véhicule, bateau, drone, hélicoptère, avion...), qui conditionne la manière de géo-référencer les données et bien sûr, les précisions accessibles. Le terme LiDAR est plus souvent employé pour décrire l'acquisition dynamique. [20]

II.3.2 La photogrammétrie numérique

La photogrammétrie numérique terrestre ou aérienne est basée sur les mêmes fondamentaux que la photogrammétrie argentique. Elle consiste à effectuer des mesures dans une scène en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Aujourd'hui, cette technique exploite de plus en plus les algorithmes de corrélation dense entre images numériques, afin de reconstituer une copie 3D de la réalité la plus exacte possible, sous la forme d'un nuage de points géo-référencés.

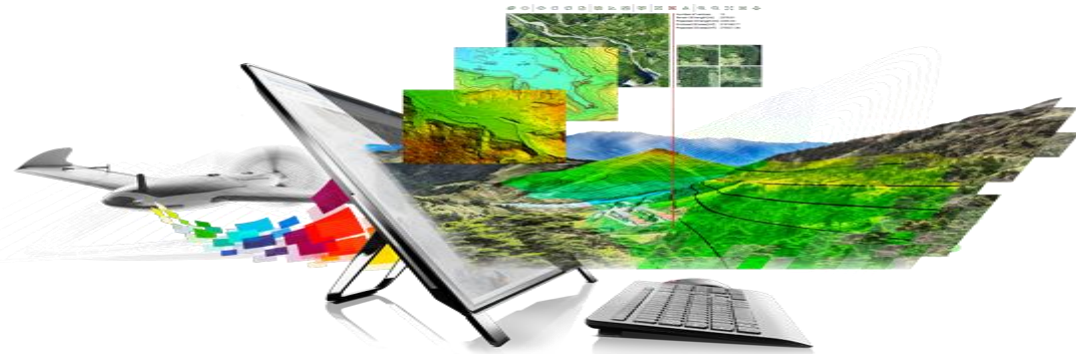


Figure II.3 : La photogrammétrie numérique par drone [2]

La reconstruction 3D peut se faire simplement à partir des clichés sur les zones en recouvrement : il s'agit de déterminer les points homologues (dits points de liaison) entre les images (avec des algorithmes de type SIFT : Scale Invariant Feature Transform), puis de réaliser la mise en géométrie par un calcul d'aérotriangulation (compensation de faisceaux). A ce stade, la reconstruction 3D de la surface apparente est exprimée dans un référentiel arbitraire sans échelle et n'est donc pas géoréférencée.

Le géoréférencement nécessite des points de calage et de contrôle en nombre suffisant, identifiables dans les clichés de la scène considérée, qui doivent être déterminés en coordonnées dans le référentiel souhaité. Cette détermination nécessite souvent une mesure en parallèle par méthode topographique classique (tachéomètre, GNSS). Les paramètres internes des caméras (focale, points principaux et distorsion radiale) interviennent bien sûr dans les calculs de géoréférencement. [20]

II.4 Présentation LEICA GEOSYSTEMS

Leica Geosystems développe, fabrique et commercialise depuis 1819 des solutions pour la topographie, la cartographie et le SIG. Elle se place parmi les entreprises majeures de son secteur, notamment grâce à ses innovations dans le positionnement par satellite (GPS / GNSS) ainsi que dans la technologie 3D qu'elle a su développer.

Leica Geosystems fait partie du groupe suédois Hexagon, fournisseur mondial majeur de technologies de l'information qui améliorent la qualité et la productivité dans toutes les applications géospaciales et industrielles des entreprises. [34]

❖ Présentation des solutions

Leica Geosystems a développé une large gamme de solutions dédiées au SIG conçue pour offrir :

- Une gamme étendue pour une solution adaptée à chaque utilisateur

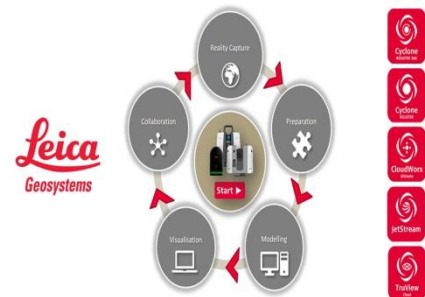
-Une synchronisation des données avec le bureau pour une mise à jour optimisée. [34]

II.4.1 LEICA GEOSYSTEMS

Révolutionnant le monde de la mesure et de la topographie depuis près de 200 ans, Leica Geosystems est le leader de l'industrie des technologies de mesure et de l'information.

Nous créons des solutions complètes destinées aux professionnels du monde entier. Reconnue pour l'innovation

de ses produits et le développement de solutions, Leica Geosystems bénéficie de la confiance de professionnels dans des secteurs aussi variés que le levé topographique et l'ingénierie, la sûreté et la sécurité, le bâtiment et la construction, l'énergie et l'industrie pour l'ensemble de leurs besoins dans de domaine géospatial. Grâce à des instruments d'une qualité inégalée, à des logiciels élaborés et à des services fiables, Leica Geosystems offre chaque jour les moyens nécessaires à ceux qui façonnent notre monde. [34]



II.5 Exploitation des données 3D

Topographiques permettent d'acquérir une information 3D sous forme de nuages de points. Cette donnée « brute » est le point de départ avant toute exploitation. La structure de cette donnée doit être bien définie et connue afin de pouvoir déployer en aval des méthodologies d'exploitation, de modélisation et de comparaison adaptées aux besoins. [20]

II.5.1 Les données d'entrées : le nuage de point 3D

Le LiDAR et la photogrammétrie numérique permettent de créer les mêmes types de livrables des nuages de points 3D dont les coordonnées tridimensionnelles dans le référentiel du levé sont connues.

En complément de ces informations géométriques, les nuages possèdent aussi des informations qualitatives en fonction du moyen d'acquisition : couleur, intensité du signal retour,... [20]

II.5.2 Densité d'un nuage de point

La densité d'un nuage de point correspond au nombre moyen de points par unité de surface. Ce paramètre informe directement sur la capacité à décrire finement la topographie ou la géométrie de l'ouvrage relevé. Plus la densité du nuage va être importante (au-dessus de 100

points par m²) plus la description géométrique pourra être fine. La densité finale doit être spécifiée lors de la définition du besoin et la préparation du relevé.

L'homogénéité de la densité du nuage, dépendra du système d'acquisition déployé. Dans la pratique, le LiDAR permet de régler la densité lors du relevé. C'est un compromis entre le temps passé sur le terrain, la taille du fichier résultant (et les temps de calcul associés), et les besoins.

Dans le cas de la photogrammétrie, les modèles numériques produits ont généralement une densité constante. Celle-ci résulte directement de la résolution pixel, réglée pour un boîtier et une focale donnés en ajustant la distance entre la caméra et l'ouvrage. Bien entendu, la densité du nuage doit aussi être en corrélation directe avec son incertitude. Une forte densité avec une forte incertitude n'est pas cohérente. [20]

II.5.3 Rééchantillonnage du nuage de point

La densité demandée lors de la préparation du relevé, doit correspondre à la finesse de description topographique souhaitée. Suivant la géométrie de la surface levée, une densité forte n'est pas forcément nécessaire sur l'ensemble de la zone. Afin de faciliter les traitements, minimiser les temps de calcul et réduire la taille des fichiers de points, l'opérateur peut être amené à simplifier le nuage de point origine. [20]

II.6 Traitement des données brutes

En aval de la phase d'acquisition des modèles bruts, un traitement de données à forte intensité de main d'œuvre est nécessaire pour obtenir des informations utiles sous forme de dessins en 2D ou de modèles en 3D. Cette phase comprend les opérations suivantes :

II.6.1 Prétraitement

II.6.1.1 Calage des différents nuages de points

Cette étape est généralement réalisée au sein de logiciels spécialisés. Pour les scanners lasers, les fabricants fournissent généralement des suites logicielles complètes qui permettent de réaliser de nombreuses opérations dont le calage sur base de points de contrôle (ou points d'appui). Notons que le référencement spatial d'un scan laser est parfois directement assuré sur site, lorsque ceux-ci peuvent être positionnés sur des points de station connus et dont l'orientation peut être déterminée par des visées sur des points de référence. [32]

II.6.1.2 Visualisation et nettoyage des nuages assemblés

Les opérations de base sur un modèle calé peuvent couvrir le débruitage (éliminer les points aberrants), le filtrage (supprimer les éléments non pertinents pour le client), l'échantillonnage (diminuer le nombre total de points par sous-échantillonnage ou rééchantillonnage) ou la

compression (réduire la taille du fichier avec ou sans perte d'information) des nuages de points bruts. Ces opérations basiques peuvent être réalisées dans de nombreux. [32]

II.6.1.3 Segmentation manuelle, semi-automatique ou automatique

Il s'agit de subdiviser le nuage en sous-ensembles cohérents, d'après un ou plusieurs critères comme la forme, le matériau, l'orientation, l'âge, etc. Cette phase n'est pas toujours requise et dépendra des livrables finaux requis. Elle peut en tout cas faciliter le travail de traitement géométrique qui suivra. [32]

II.6.2 Contrôle qualité

Une procédure de contrôle qualité est un gage de sécurité qui peut être particulièrement critique lorsqu'une très haute justesse est requise. Malheureusement, de telles procédures sont encore difficiles à mettre en place et il n'existe que peu de recommandations en la matière. Il est néanmoins possible de prévoir davantage de points de contrôle que strictement nécessaire pour le calage des différents nuages de points. Des cibles surnuméraires, relevées à la station totale, peuvent permettre d'obtenir un meilleur contrôle sur la justesse du modèle. Notons qu'un contrôle qualité sérieux est un processus qui concerne l'entièreté de la mission de mesure. Ainsi, des étapes de vérification préliminaire des données sur site peuvent fournir une première estimation de la qualité du relevé. [32]

II.7 Les logiciels de traitement du nuage de points 3D

Il est primordial de s'intéresser dans un premier temps aux différents logiciels capables d'interagir avec un nuage de points et étudier les possibilités de modélisation dans le cadre de la réhabilitation. En effet, il est important de connaître toute la chaîne de traitement pour proposer un outil d'automatisation efficace. [25]

II.7.1 Cyclone 3DR

Leica Cyclone 3DR est une nouvelle extension intégrée de la suite logicielle Cyclone, la solution de référence de manipulation des nuages de points, qui accompagne les utilisateurs pendant toutes les étapes de leurs projets de capture de la réalité 3D : de la collecte de données sur le terrain avec Cyclone FIELD 360, en passant par l'enregistrement dans Cyclone REGISTER 360, au traitement et à la création de livrables dans Cyclone 3DR.

Cyclone 3DR fusionne la technologie Leica JetStream pour une gestion centralisée et complète des nuages de points.

Alors que la plupart des logiciels se concentrent sur une séquence de tâches unique pour créer un livrable spécialisé, Cyclone 3DR offre en un seul logiciel une utilisation simple basée sur des flux de travail adaptés aux domaines de la topographie, de la construction et de l'ingénierie civile. Cyclone 3DR inclut également une large gamme d'outils adaptables aux différents besoins en traitement des données 3D comme l'inspection, la modélisation ou la génération de livrables et de rapports 3D.

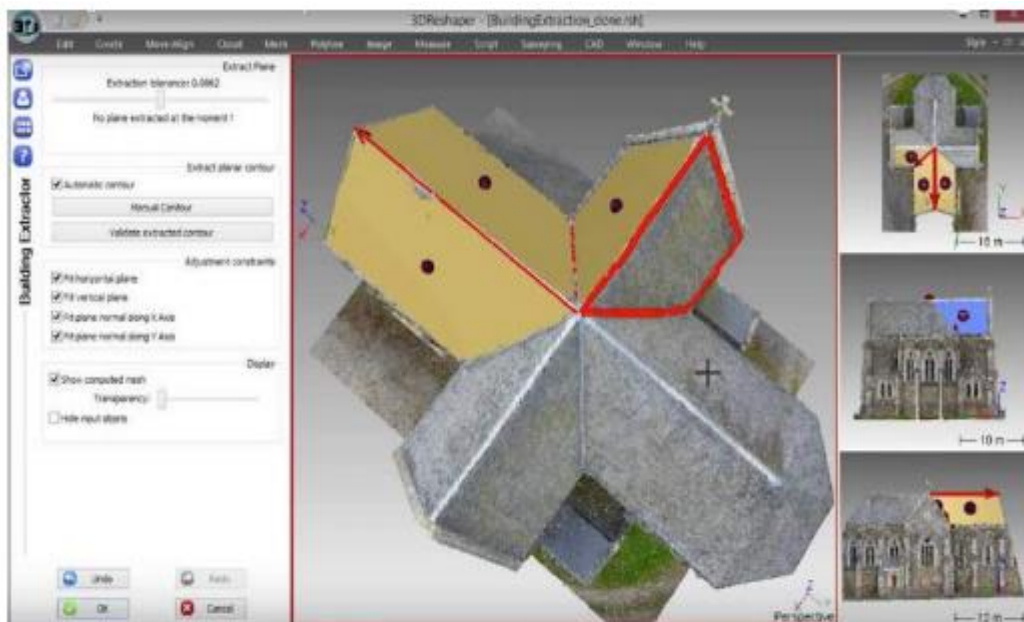


Figure II.4 : Extraction des plans avec le module Building Extractor [25]

En automatisant les tâches courantes, les clients peuvent réduire les délais dans les projets et fournir rapidement des informations exploitables pour leurs clients. [33]

II.7.2 RealWorks

Distribué par TRIMBLE, il permet la lecture et l'assemblage des scans. Ce logiciel est actuellement utilisé par Campenon Bernard Topographie. Ses principaux atouts sont la gestion des gros nuages de points et la vitesse d'exécution des différentes tâches réalisables. Le recalage des stations de scans se fait simplement et est largement automatisé. Il peut s'effectuer à l'aide de cibles préalablement positionnées à l'acquisition des données mais également grâce à la détection de points commun.

La segmentation, l'échantillonnage et la réalisation d'orthophoto constituent les avantages importants de ce logiciel, en plus de ses possibilités de lecture et de recalage des relevés 3D effectués. Il est possible de créer plusieurs objets en segmentant le nuage et de les exporter individuellement. L'exploitation directe des points est possible grâce à l'intégration du logiciel

Sketchup. La figure visible ci-dessous illustre l'organisation du logiciel, avec l'arborescence des différents objets créés ainsi que la fenêtre de visualisation du nuage de points. [25]

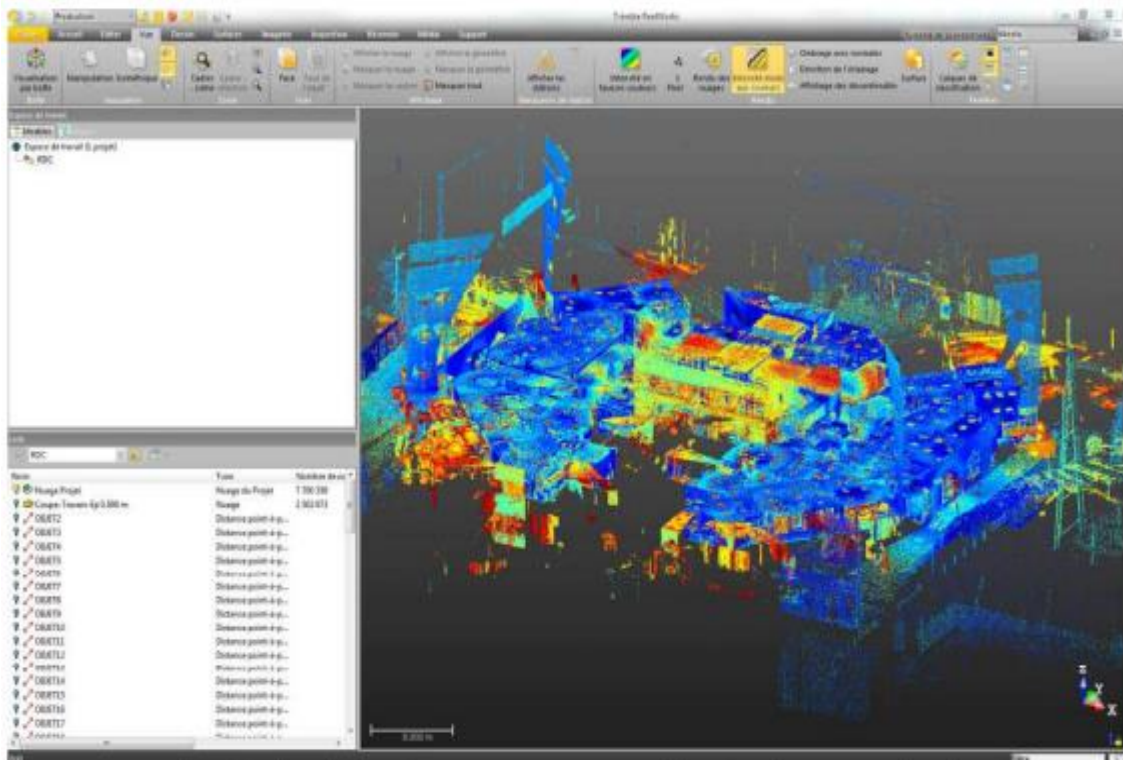


Figure II.5 : Visualisation d'un nuage contenant 7,7 millions de points sous Realworks

II.7.3 Cyclone

Leica a également son propre logiciel de traitement pour les données issues de scanners 3D. Cyclone se comporte comme une base de données. Suite à l'import des fichiers relevés, un dossier se crée pour chaque station.

Dans l'arborescence du projet, plusieurs éléments sont visibles, dont :

- Une visualisation du nuage de points ;
- Le relevé effectué sur chacune des cibles ;
- Les photos capturées durant le relevé.

Le logiciel est peu convivial à cause de son interface Peu lisible et de son arborescence parfois complexe. Lorsque les

Scans sont nombreux, les étapes de recalage et de

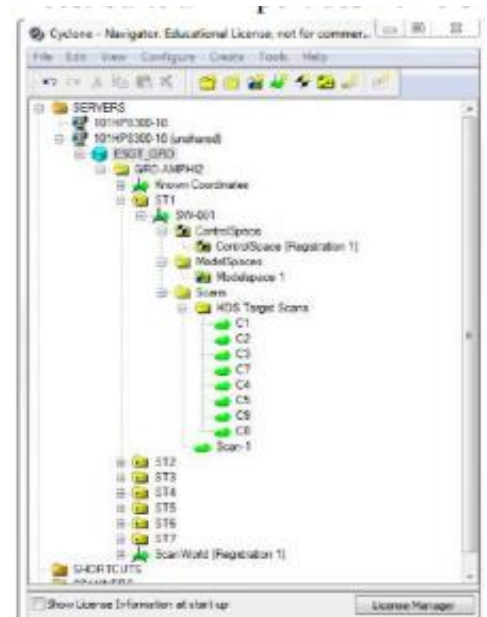


Figure II.6: Arborescence d'un projet [25]

géoréférencement peuvent être assez longues. Cet aspect représente donc un inconvénient majeur.

En effet, dans le cas de réhabilitation, les bâtiments ont parfois des surfaces importantes. La disposition et l'agencement des pièces demandent d'effectuer de nombreuses positions de numérisation.

Pour la suite de l'exploitation des données, Cyclone est composé de différents modules pour chaque fonction disponible (géoréférencement, analyse de données...). Il permet de s'adapter à l'utilisateur et d'offrir un logiciel à la carte. Cependant, aucune détection n'est possible.

Pour pallier ce manque de fonctionnalité et de convivialité, Leica propose l'outil CloudWorx. Il s'agit d'un plug-in performant pour traiter les nuages de points avec les logiciels DAO. Il est disponible dans de nombreuses suites logicielles :

- Autocad,
- Revit. [25]

II.7.4 Recap Pro

L'outil gratuit Recap d'Autodesk permet d'obtenir à partir d'un fichier issu du scanner laser un document .rcp exploitable dans Revit. C'est avant tout un logiciel de conversion.

Il existe également une version payante, Recap Pro. Elle possède plus de fonctionnalités. De nombreux formats en import sont disponibles, quel que soit la marque du scanner laser utilisé pour le relevé. Il est possible d'assembler et de géoréférencer les scans effectués. Cependant, il n'est pas capable de détecter automatiquement les cibles permettant l'appariement des différents nuages. Cela peut devenir dommageable pour les gros chantiers. L'utilisateur est obligé de cliquer sur chacune d'elles, cette étape peut s'avérer assez longue.

Ensuite les points peuvent être visualisés selon leurs couleurs, leur élévation ou par sélection manuelle. Le nuage peut être segmenté en plusieurs zones.

Le nuage peut ensuite être exporté dans d'autres formats que RCP, et notamment en PTS, las, E57... Ce dernier format est un format d'échange supporté par grand nombre d'applications. Le fichier las, utilisé à l'origine pour le traitement des données Lidar aéroporté, est aussi très répandu. [25]

II.7.5 Choix d'un logiciel de traitement

Tableau 7 : Avantages et inconvénients des logiciels de traitement testés [25]

	Avantages	Inconvénients
Cyclone 3DR	Création de maillages simple, rapide et efficace Fonctionnalité « Building Extractor»	Étape de détection des plans fastidieuse Pas de lien avec un logiciel de modélisation
RealWorks	Recalage automatique Gestion des gros nuages Intégration de Sketchup	Format d'import Modélisation limités
Cyclone	Robustesse d'une base de données	Interface peu convivial Nécessité de CloudWorx Pas de recalage automatique
Recap Pro	Simplicité d'utilisation Réelle interaction avec le nuage Export au format RCP	Peu adapté pour des gros chantiers

II.8 Modélisation

Selon notre approche, la modélisation est une science exacte à la fois théorique et appliquée. Elle conjugue modèles mathématiques, géométriques et Systèmes d'Informations. Elle englobe un ensemble de services opérationnels conjuguant les méthodes et technologies de création et de reconstitution de données géométriques, techniques et fonctionnelles à différentes échelles et pour différents métiers et domaines.

Au sens large, il s'agit d'objets à différentes échelles relevant des domaines de l'industrie, du bâtiment, de la ville ou du territoire. Nous les regroupons sous les 2 appellations concepts de « Smart City » et « Smart Industry ».

II.8.1 Point

Le scanner laser 3D permet grâce à sa technologie, de collecter en un minimum de temps, (quelques minutes seulement permettent une prise de vue en intérieur), une quantité importante de points dans les trois dimensions X, Y et Z (comptés par millions), avec une précision largement suffisante pour le bâtiment (de l'ordre de quelques mm par mesure).

Le résultat obtenu après assemblage des différents points de vue donne naissance à un premier modèle 3D sous la forme d'un « nuage de points ». [9]

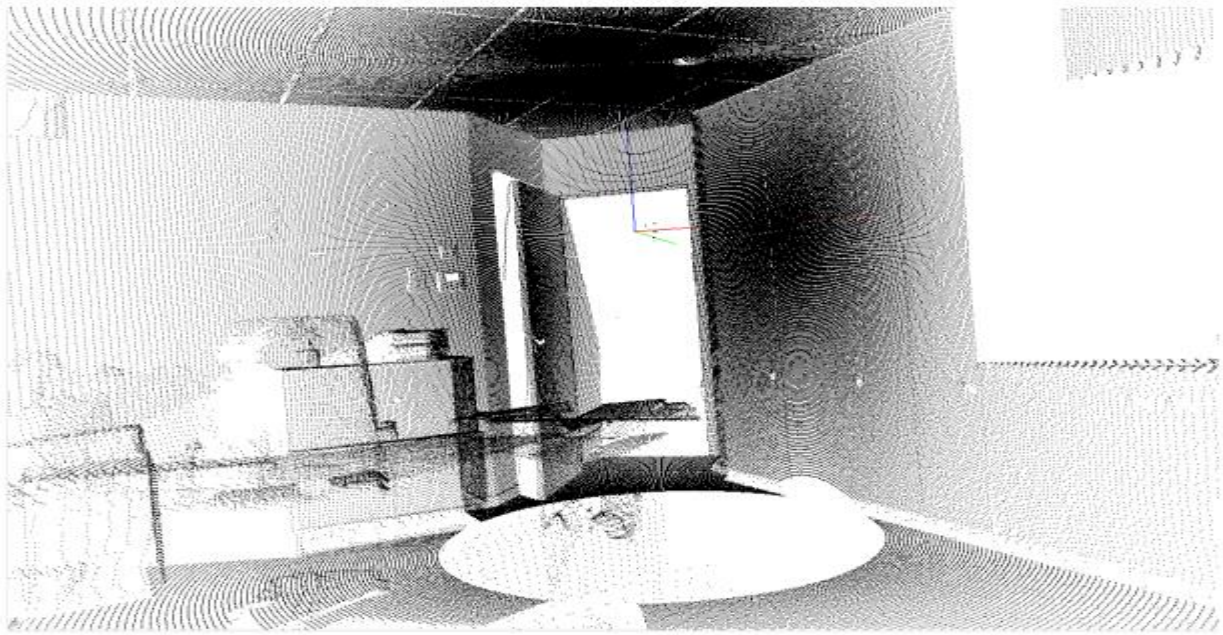


Figure II.7 : Nuage de points noir & blanc issu d'un relevé au Scanner laser 3D [9]

Lors de la prise de vue, le scanner effectue deux passes. Au premier passage il capte une quantité quasi exhaustive des points vus par le faisceau du laser, (Figure II.7) et lors de son deuxième passage il effectue un reportage photographique sur presque 360° (Sauf sous le pied du scanner). Ces photos permettront, lors du post traitement des données collectées, la colorisation du nuage de points final.



Figure II.8 : Nuage de points colorisé issu d'un relevé au Scanner laser 3D [9]

Le modèle 3D obtenu à ce stade est constitué ici d'une multitude de points correctement positionnés dans l'espace et dont la représentation hyperréaliste est liée à la phase de colorisation précédemment évoquée ; d'où l'appellation « Nuage de points ».

À cette étape de la modélisation le modèle 3D, ne constitue donc en aucun cas une maquette virtuelle immédiatement exploitable en BIM par nos logiciels de CAO ou d'Architecture. Il devra subir à son tour diverses transformations géométriques avant d'en permettre l'obtention dans nos outils métiers. [9]

II.8.2 La 2D

La production de pièces graphiques 2D à partir d'un nuage de points passe par une étape de vectorisation manuelle ou semi-automatique d'une tranche de points extraite du nuage.

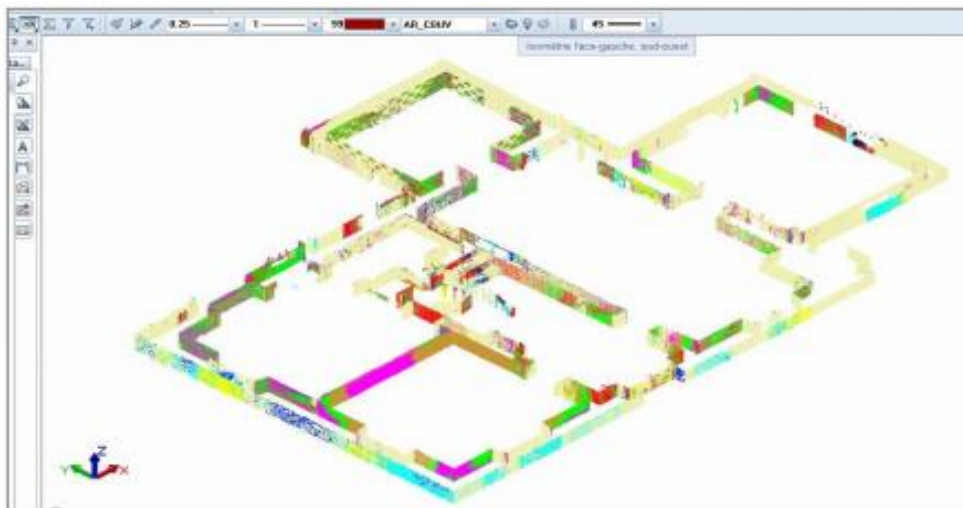


Figure II.9 : Vue Axonométrique d'une Tranche de Points Extraite d'un Nuage

- L'opérateur importe cette tranche de point extrêmement fine ($Z \pm \text{constant}$) dans son logiciel de CAO et s'appuie dessus pour dessiner en 2D les contours souhaités.
- Il peut travailler directement à partir du nuage de points, dans certaines applications de type Autodesk ReCap. Pour réaliser ce travail de préparation.

Autocad 2016 intègre des fonctions de traitement de nuages de points au format « rcp » en association avec le logiciel ReCap.

- Certains logiciels de post-traitement des données de scan 3D comme Vectorize I d'Autodesk sur tablette, PointCab ou Real Works de TRIMBLE proposent également une fonction de vectorisation semi-automatique. Le résultat obtenu reste à ce jour limité car il produit en fait une multitude de sections de lignes qu'il faudra ensuite judicieusement regrouper au sein de

chaque entité puis les réunir en polygones. Ci-dessous un exemple avec le logiciel Autodesk Recap sur I Pad. [9]

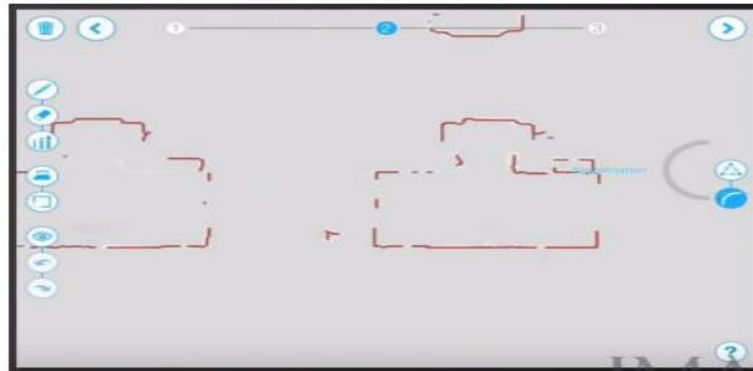


Figure II.10 : Génération de dessins 2D à partir de nuages de points à l'aide d'Autodesk Recap[9]

Ou encore ci-dessous un exemple avec PointCab, sur PC :

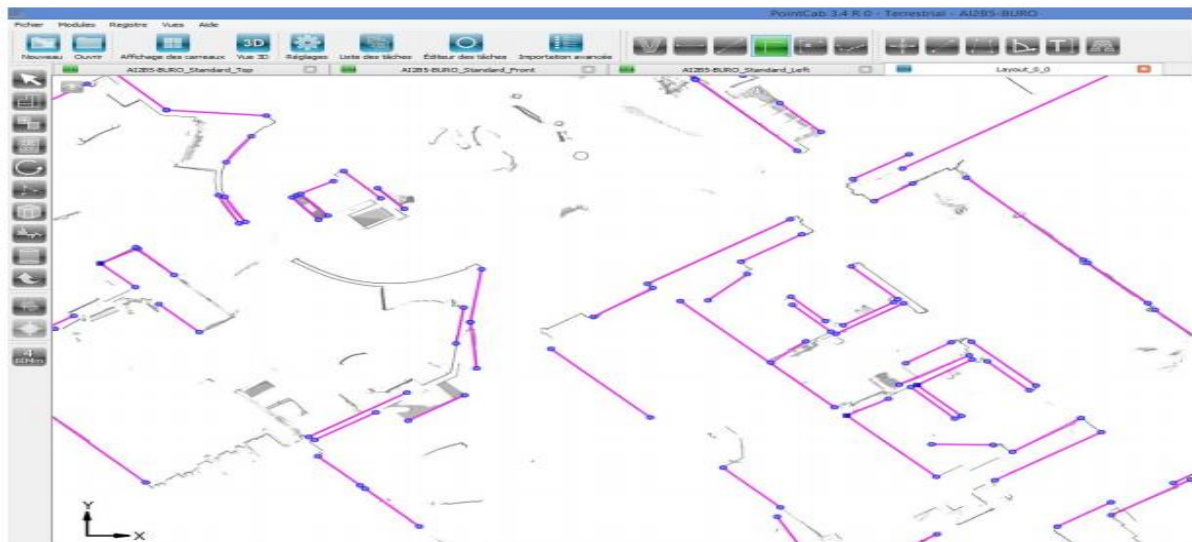


Figure II.11: Vectorisation semi-automatisée sous PointCab

➤ Parfois, ponctuellement, certains logiciels de CAO comme Catia intègrent en interne cette fonction.

Une autre méthode consiste à produire des ortho-photographies ou ortho-images, à partir d'une tranche de points issue du nuage. Le résultat produit cette fois-ci un fichier image, donc pixellisé, comme ci-dessous. [9]

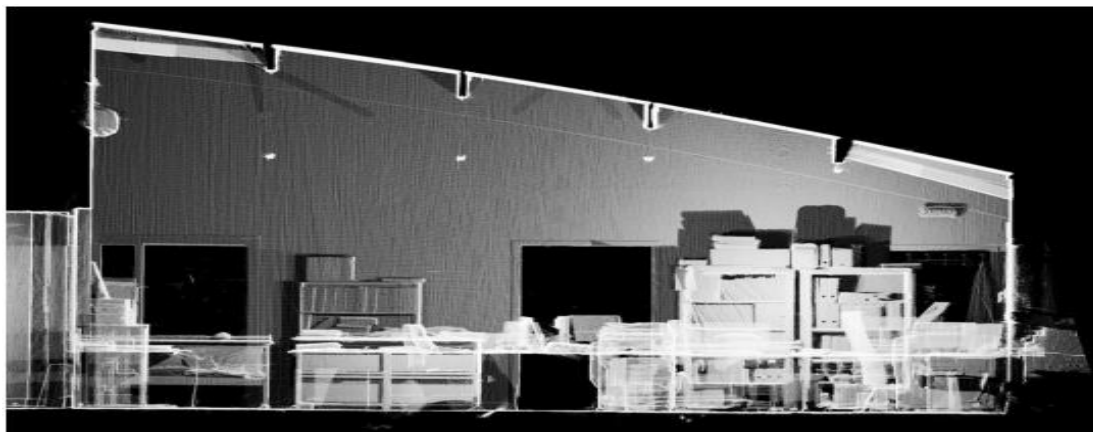


Figure II.12 : Orthophoto Intérieure Élévation sur Bureau

Importée dans le logiciel de CAO en arrière-plan du calque de travail, l'orthophoto servira d'accroche au dessin 2D pour créer une façade ou une coupe comme ci-dessous :

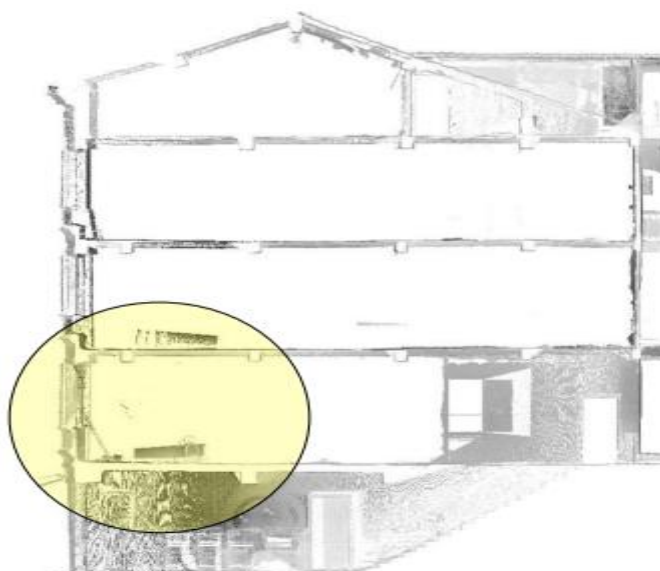


Figure II.13 : Orthophoto Intérieure Coupe dans Bâtiment

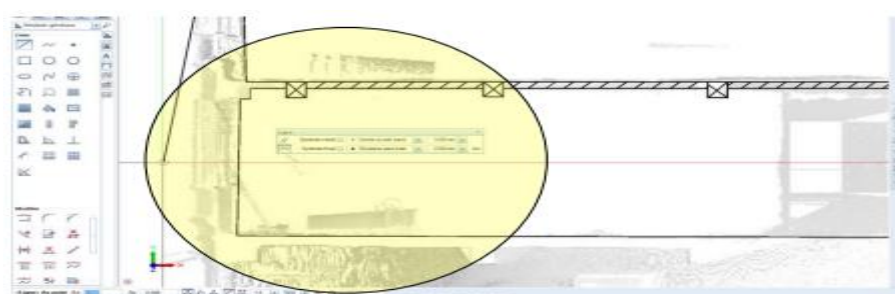


Figure II.14 : Orthophoto Importée en Arrière-Plan dans la CAO comme Aide au Dessin 2D.

II.8.3 La définition de la 3D

En deux ou trois dimensions, le dessin assisté par ordinateur équivaut au dessin conventionnel, exécuté uniquement sur ordinateur. Les points, les lignes et les symboles peu intelligents sont utilisés pour exprimer l'intention de conception ou les méthodes et moyens de

construction détaillés. Le plus souvent, tracé sur un support papier et publié sous cette forme à des fins de dessins et de spécifications, et remis au propriétaire, à l'entrepreneur ainsi qu'aux autorités et agences examinatrices pour approbation et construction effective. [27]

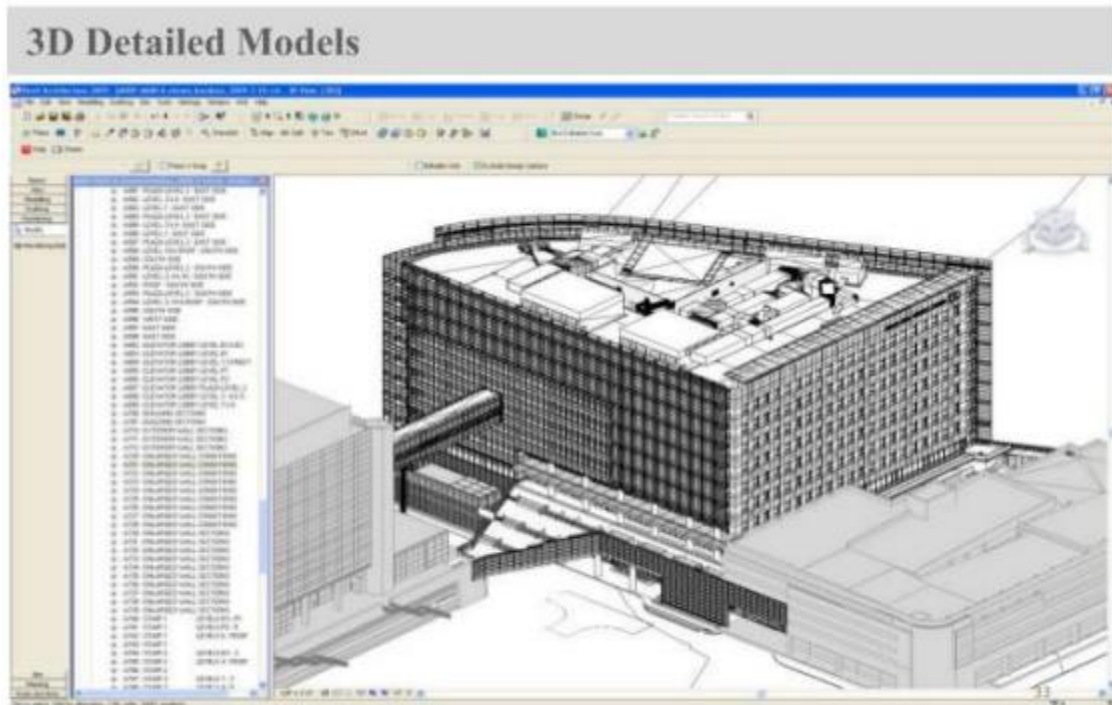


Figure II.15 : Module en 3D [2]

II.8.3.1 Caractéristiques

- Objets "intelligents" et paramétriques
- Librairies d'objets disponibles
- Création de familles d'objets par les fournisseurs

II.8.3.2 Principaux usages

- Conception
- Revue de constructibilité
- Détection d'interférences. [26]

II.8.4 Typologies des modèles 3D

Il est indispensable de faire un court rappel sur les différents types de modèles 3D. En effet, la rédaction d'un cahier de charge de relevé haute définition du bâtiment est indissociable d'une définition précise et complète des livrables ainsi qu'éventuellement des précisions quant à l'utilisation finale de ces livrables. Cela couvre entre autres la définition du type de modèle 3D, du format de sortie désiré et d'éventuelles données contextuelles et environnementales. [29]

Lorsqu'il est question du type de modèle, il est d'abord essentiel de distinguer les modèles directs « tels que saisis », issus du relevé, des modèles indirects ou « construits » obtenus par un processus de modélisation ou par reconstruction à partir de photos. La sortie type d'une méthode de relevé est un nuage de points (Figure II.16). Ce dernier peut donc être généré directement comme pour le scanner laser ou indirectement comme pour beaucoup de logiciels de reconstruction photogrammétrique. A minima, les formats informatiques de nuage de points enregistrent la localisation X, Y, Z de chaque point dans l'espace. Une donnée de couleur peut être adjointe à chaque point. [29]



Figure II.16 : Un nuage de points de haute résolution avec information [2]

Un deuxième type de modèle est le maillage polygonal composé d'un ensemble polyédrique décrit par des sommets et des arêtes formant des triangles (on parle donc aussi de maillage triangulé) (Figure II.17). Il s'agit donc d'une représentation continue de l'objet. Les surfaces délimitées par les différentes arêtes peuvent être représentées (modèle surfacique) ou non (modèle filaire). De tels modèles sont souvent obtenus par transformation à partir d'un nuage de points, généralement au moyen d'un algorithme automatique dit de « polygonisation » ou « facettisation ». Cependant, certaines méthodes de reconstruction photogrammétrique généreront directement de tels maillages comme sortie pour l'utilisateur. [29]

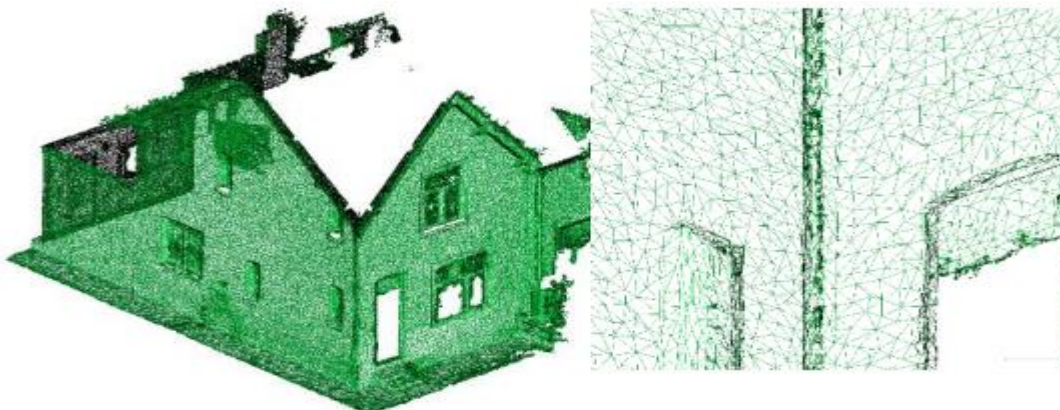


Figure II.17 : Un modèle filaire [2]

Les modèles géométriques sont quant à eux issus strictement d'un processus de modélisation à partir d'un nuage de points ou d'un maillage à l'aide de primitives géométriques telles que des plans ou des cylindres. Les primitives peuvent être uniquement des volumes, générés par exemple par extrusion, auquel cas on peut parler de modèle solide. Une telle approche génère des modèles plus sobres au niveau esthétique et plus légers. En revanche, une grande partie des détails de surface est perdue. Dans sa forme la plus aboutie, la démarche de modélisation visera à créer des « objets paramétriques » auxquels des propriétés peuvent être associées ; il s'agit de la base de la création d'un « Building Information Model ». [29]

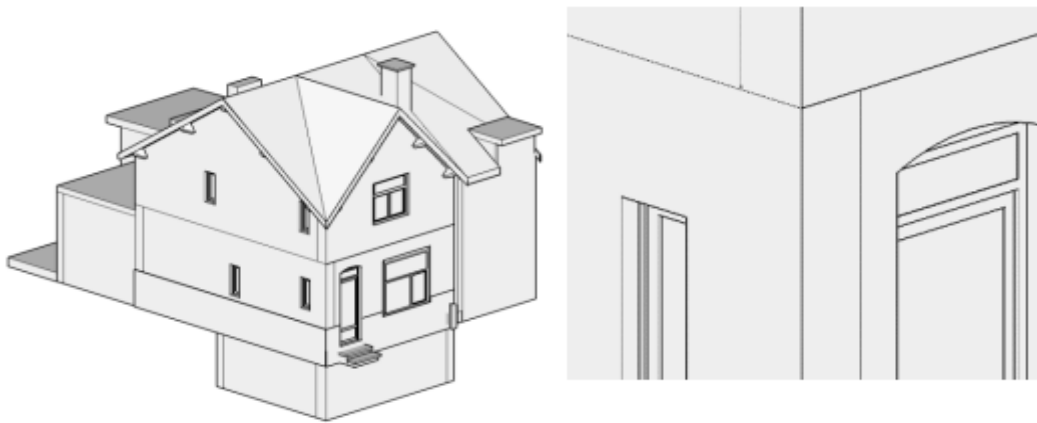


Figure II.18 : Un modèle nuage de points de haute résolution avec information [2]

II.9 Les logiciels de modélisation 3D

Nous allons désormais nous intéresser aux différents logiciels disponibles qui permettent de modéliser des objets en trois dimensions en vue de produire une maquette numérique. Les possibilités de travailler à partir du nuage de points seront analysées.

Ils sont assez nombreux sur le marché. C'est pourquoi il est primordial de les tester dans la mesure du possible et d'étudier à chacun leurs avantages et inconvénients. [25]

II.9.1 AllPlan

La cellule de recherche BIM de Vinci a débuté la modélisation avec AllPlan, logiciel du groupe Nemetschek. L'interface intuitive permet une prise en main facile et rapide du logiciel. Le format d'échange IFC, qui tend à devenir le format d'échange est supporté en import et en export.

Il offre de très nombreuses possibilités de modélisation. Depuis peu, l'import de nuage de points est possible mais demande l'installation d'un module complémentaire assez coûteux.

Bien qu'il soit un très bon logiciel de modélisation. Il reste tout de même en retrait face à ses concurrents, notamment au niveau de la bibliothèque d'objets disponibles. L'exploitation du

nuage reste très limitée avec le logiciel de base. Il n'est donc pas forcément adapté pour une utilisation en réhabilitation, malgré ses évolutions majeures de ces dernières années. [25]

II.9.2 Autodesk

Autodesk est très connu dans le monde de la DAO classique et a su prendre le tournant de la modélisation 3D en vue d'une utilisation BIM. La société apporte les ressources nécessaires à l'utilisateur avec AutoCad Architecture et Revit.

La modélisation 3D nous oblige à changer notre approche habituelle avec le dessin 2D classique. Cependant, Autocad reste un acteur majeur, il est donc important d'étudier ses possibilités. La fonction d'insertion de nuage de points est assez récente ; une manipulation préalable est obligatoire, à travers le logiciel Recap.

Cependant la version classique d'Autocad suffit pour effectuer des modélisations 3D mais pas pour réaliser une maquette numérique. En effet, les objets créés ne sont pas dit « intelligents » et restent une simple représentation qui est ensuite figée. [25]

II.9.2.1 AutoCad Architecture

La solution proposée par Autodesk se nomme AutoCad Architecture. Elle se présente comme une alternative à Revit. Les utilisateurs habitués à travailler avec Autocad en DAO classique retrouveront leurs marques rapidement grâce à une interface intuitive.

La bibliothèque des objets disponibles est complète. Elle est tout de même moins riche que les autres solutions présentées dans cette partie. Les éléments sont insérés dans différents calques. La gestion des objets est donc relativement simple. Les éléments sont paramétriques et les propriétés sont modifiables facilement. Malheureusement, ce ne sont pas des objets intelligents. [25]

II.9.2.2 Revit

C'est l'un des logiciels les plus intéressants actuellement proposé sur le marché. Sa bibliothèque de familles d'objets est complète et puissante. La création de nouveaux éléments est possible grâce à un éditeur d'objet inclus.

Chaque objet est intelligent. Les propriétés sont paramétrables manuellement et se mettent à jour lorsque des objets liés sont modifiés. Une base de données regroupe l'ensemble des informations et permet de créer des listings ou métrés des éléments.

Les limites du logiciel sont difficiles à atteindre, en contrepartie il faut une machine bien équipée capable de supporter le poids et les besoins du logiciel. Sa prise en main est également la

plus difficile, et demande une période d'adaptation. Lors du processus de collaboration, il est important que chacun possède la même version de Revit. Il n'est pas possible d'enregistrer dans un format de version antérieure. [25]

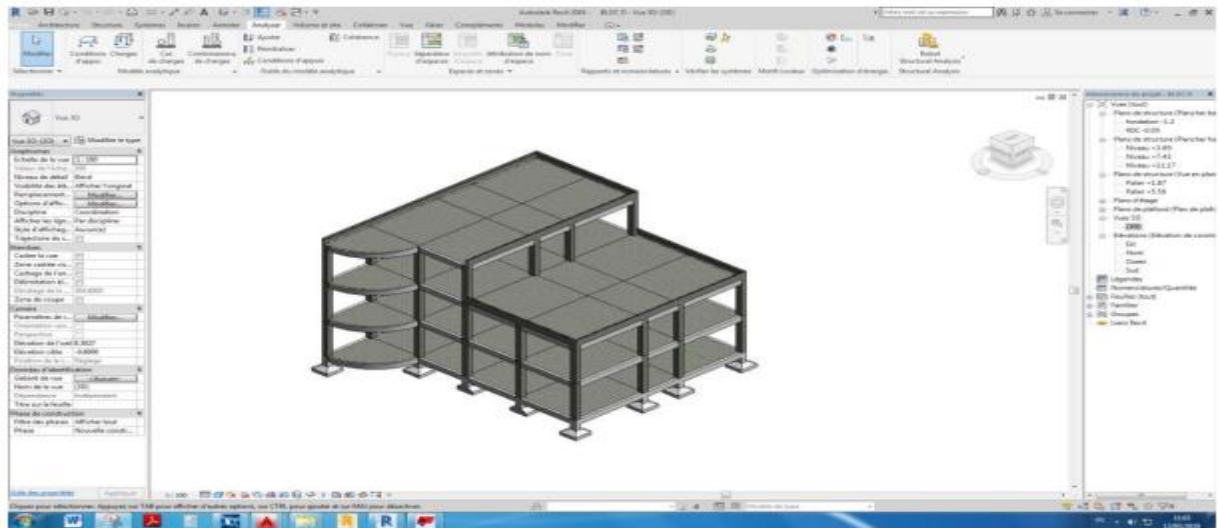


Figure II.19 : Exemple de structure modelée dans Autodesk Revit

Grâce à son expérience, Autodesk propose un logiciel complet et qui ne cesse d'évoluer. De nombreux plug-ins sont disponibles pour automatiser certaines tâches, notamment celles qui concernent la manipulation et l'export d'éléments dans la base de données.

Il existe plusieurs possibilités pour créer une maquette numérique sous Revit :

- À partir du nuage de points
- À partir d'un plan 2D ou 3D. [25]

II.9.3 SketchUp

TRIMBLE est propriétaire de ce logiciel, issu de l'initiative de développement de Google. Le lien avec RealWorks est réalisé avec la fonction Scan Explorer ce qui constitue un atout majeur.

Une des fonctionnalités intéressantes est la détection des arrêtes contenues dans le nuage de points. Les éléments sont ensuite exportés automatiquement dans le logiciel de modélisation. Ils constituent une base au travail de création de la Maquette numérique. L'utilisateur n'intervient pas pour positionner les murs.

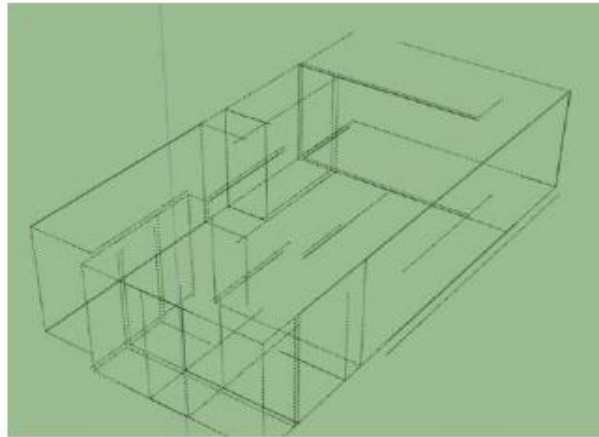


Figure II.20 : Segments extraits à partir de RealWorks [25]

SketchUp est désormais compatible avec la norme IFC depuis sa version 2015. La bibliothèque disponible est complète et le développement d'outils est assez simple. Cependant, après avoir modélisé les murs par extrusion, leurs caractéristiques doivent être rentrées manuellement. La procédure à effectuer est assez fastidieuse.

Il a également d'autres inconvénients. Le principal est qu'en l'absence de TRIMBLE RealWorks, aucun lien n'existe avec le nuage de points Sources. On peut également observer des écarts entre les arrêtes et les faces extraites à partir d'une même surface. Un réajustement est donc à effectuer pour obtenir une modélisation correcte du bâtiment. [25]

II.9.4 Choix d'un logiciel de modélisation

La réalisation d'une maquette numérique est relativement chronophage et nécessite plus de temps qu'une simple modélisation. Le logiciel retenu se doit donc d'être performant tout en restant simple d'utilisation.

De plus, en vue d'une application BIM, la compatibilité IFC est obligatoire. L'insertion de nuage de points est également essentielle dans le cas de la réhabilitation de bâtiments. L'ensemble des solutions logicielles présentées dans cette partie réunissent ces deux conditions pour pratiquer le « Scan To BIM ».

Mon choix s'est porté sur le logiciel Revit. Il possède une légère avance sur ses concurrents. Sa bibliothèque est très complète et sans limite de création d'objets personnels ou de gabarits. Les possibilités de programmation et de personnalisation sont particulièrement intéressantes.

De plus, la politique actuelle de VCF est de favoriser l'utilisation des logiciels Autodesk. Dans cette optique, la cellule BIM de Paris a délaissé AllPlan pour se consacrer entièrement à Revit. Des gabarits et des familles d'objets propres à Vinci ont été créés. [25]

II.10 Les outils informatiques dans la conception architecturale et Génie civil

De nos jours, l'outil informatique prend de plus en plus d'ampleur dans notre vie quotidienne. Dans le domaine de l'architecture et Génie civil, le DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et la CAO (Conception assistée par Ordinateur) sont devenus des outils obligatoires dans la pratique architecturale et civile actuellement. C'est la raison pour laquelle elle est introduite dans la formation de l'architecte et civil. Toujours dans cette perspective, S.Huot²⁷ souligne que l'avancée de l'ordinateur avec ses systèmes graphiques depuis les années 70 ont joué un rôle important dans l'évolution des outils numériques dans le monde architectural et Génie civil. Et que ceci influencerait positivement le processus de la conception, la gestion des données, les visualisations (rendus)... Cependant, il faut rappeler que cette assistance informatique procure à son utilisateur les moyens pour former son idée et de l'aider à progresser plus facilement dans les différentes phases du projet. Il doit l'aider aussi dans les prises de décisions.

Pour distinguer le DAO et la CAO, on peut dire que les modèles du DAO sont d'ordre du bidimensionnel et qu'il peut être intégré au CAO. Les modèles de cette dernière sont d'ordre tridimensionnel. [25]

II.10.1 Le DAO

Le DAO ou Dessin assisté par Ordinateur est un outil qui permet de produire des dessins avec les procédures classiques du dessin industriel. Cet outil simple permet la création et la modification des dessins techniques.

Dans le dictionnaire en ligne « L'internaute », le DAO est défini ainsi : « DAO signifie Dessin Assisté par Ordinateur. Le DAO est un système permettant de réaliser des dessins techniques avec un logiciel. Il utilise la plupart du temps le mode vectoriel ».

Cette méthodologie informatisée du dessin prend la place de la méthode classique, à savoir la planche à dessin et les outils de dessin (crayon, équerre, compas...). Ces outils « classiques » ou « traditionnels » sont remplacés par le clavier et le souris. [25]

II.10.2 La CAO

La CAO, ou conception assistée par ordinateur, est la méthode la plus ancienne. Il s'agit d'un outil de conception et de documentation qui utilise la technologie informatique pour atteindre le modèle le plus précis, le plus complet et le plus riche en informations possible. Il est en général utilisé pour la conception et l'ingénierie de projets complexes qui comprennent de multiples

composants et pièces de précision, allant d'un téléphone portable à un avion en passant par un bâtiment.

La CAO utilise à la fois des dessins 2D et des modèles 3D. La CAO 3D est la norme en matière de fabrication depuis les années 1990 ; cette technologie a apporté de nombreux bénéfices à l'industrie, notamment en permettant l'exécution rapide et efficace d'un travail de conception très complexe. L'adoption généralisée de la CAO 3D a en grande partie été motivée par le besoin des entreprises de rester compétitives.

En effet, la CAO 3D permet une livraison de produits beaucoup plus rapide. Ainsi, toute entreprise n'utilisant pas la CAO 3D prendrait inévitablement du retard sur les autres. La CAO 3D a dès lors été de plus en plus utilisée dans la conception de bâtiments. [24]



Figure II.21 : Développement de la maquette numérique [2]

II.11 La différence entre la CAO 3D et le BIM

Les changements de rythme de la conception et de la technologie dans l'industrie du bâtiment ont engendré un certain climat de confusion. Des nouvelles méthodes, des nouveaux processus et de nouveaux logiciels apparaîtront sous la forme de mises à jour des anciennes versions, alors que d'autres opéreront en parallèle, tout en ayant des applications très différentes. D'autres sont complémentaires mais ont des qualités uniques bien définies qui peuvent parfois être négligées par le commun des mortels.

La confusion qui règne actuellement au sujet de la CAO, du BIM est illustre parfaitement cette situation. En ce qui concerne le BIM, la question que ceux qui ne sont pas familiarisés avec ce processus se posent le plus souvent est la suivante : ne s'agit-il pas tout simplement d'un outil de CAO 3D ? De la même manière, la CAO est souvent confondue avec le BIM, et vice versa. Dans une certaine mesure, tout dépend de la technologie ou du procédé avec lequel l'utilisateur s'est familiarisé en premier. Pour ceux qui sont calés sur les trois méthodes, les différences sont assez claires. [24]

II.12 Le cheminement de l'information 3D

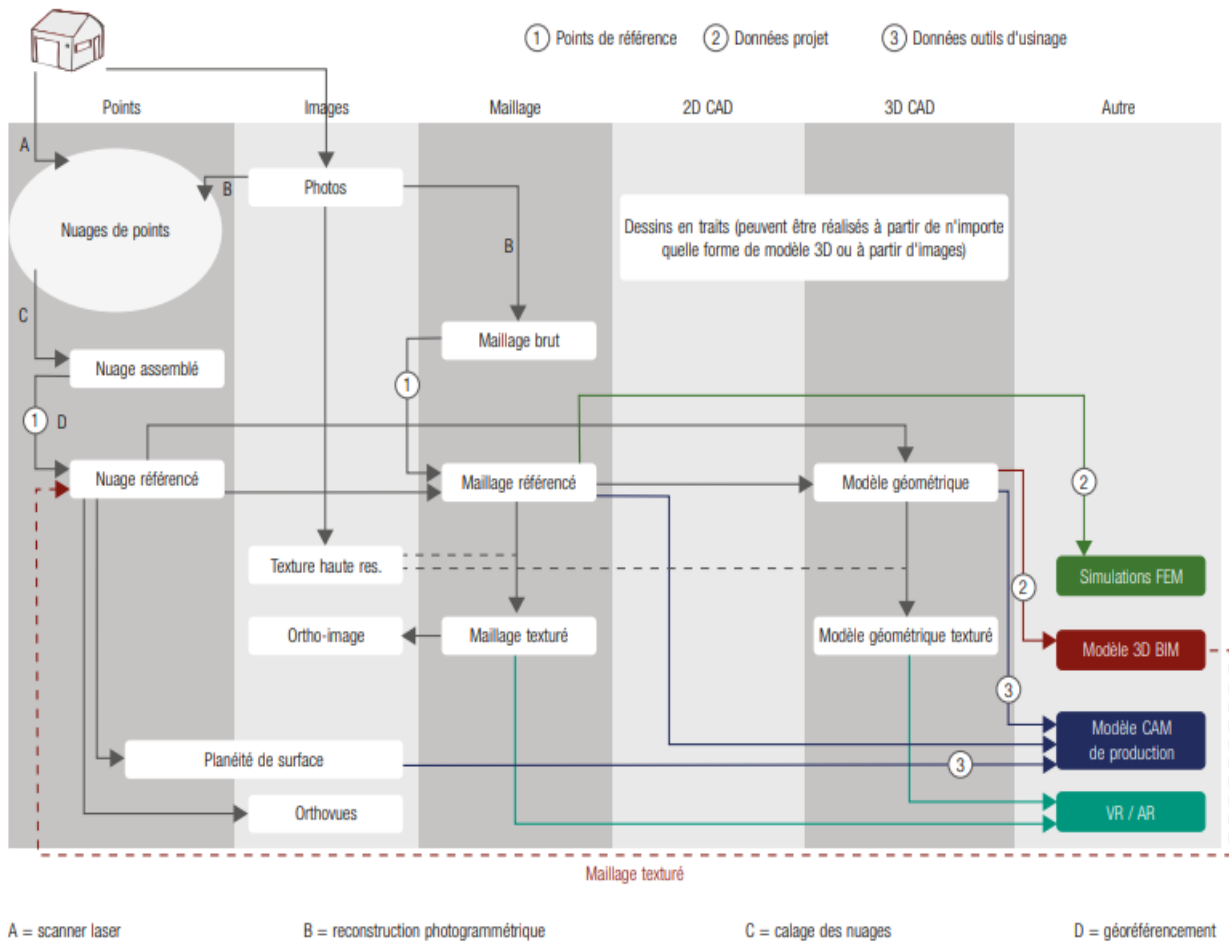


Figure II.22 : Le cheminement de l'information 3D [32]

CHAPITRE III :

CAS PRATIQUE

III.1 Introduction

Cyclone 3DR est un logiciel dédié au traitement de nuages de points, peu importe leur origine: scanners lasers 3D, photogrammétrie, drones, ou tout autre système de digitalisation. Il couvre tous les besoins en terme de traitement de nuages, maillage 3D et reconstruction de surfaces.

Vous pouvez importer un ou plusieurs nuages de points quelles que soient leur origine et leur taille aux formats génériques ou propriétaires.

L'étape de traitement de nuage de points peut s'avérer être indispensable pour gagner du temps sur la suite du traitement (modélisation par exemple).C'est pourquoi Cyclone 3DR met à disposition un éventail de fonctions simples et puissantes, telles que :

- Import sans réelle limite du nombre de points d'un ou de plusieurs nuages
- Découpage automatique (segmentation en fonction des positions de scans, de la distance, des couleurs réelles ou d'inspection)
- Nettoyage automatique (angle, valeurs d'inspection) ou manuel
- Extraction de points uniformément espacés, homogénéisation de la densité
- Réduction du bruit de mesure
- Couleurs du nuage en fonction d'une direction donnée
- Comparaison 3D avec un modèle CAO

Cyclone 3DR propose des outils dédiés aux besoins du marché des topographes.

- Extracteur de sol : calcul du MNT à partir des nuages de points
- Extracteur de bâtiment : créez facilement des modèles de bâtiment simples directement sur un nuage de points
- Analyse de surface : outils pour contrôler la planéité, le niveau et la pente d'une surface
- Lignes de contour : créez rapidement des lignes de contour sur un maillage
- Sections transversales : flux de travail complet pour l'inspection des tunnels et des routes
- Projets de stockage : flux de travail rapide et facile pour calculer et rapporter les volumes de stockage sur les nuages de points

-Analyse des réservoirs : trouvez le meilleur cylindre et inspectez rapidement la verticalité, l'arrondi ou la plomberie. [35]

III.2 Modélisation Numérique de Terrains

Si vous livrez régulièrement des Modèles Numériques de Terrains (MNT) à vos clients, alors est Cyclone 3DR l'outil qu'il vous faut. Il vous permet d'extraire très facilement le sol sur un nuage brut, de calculer des courbes de niveaux ou bien encore des lignes de rupture. [35]

III.2.1 Extraction de Terrain

La commande Extraire Terrain de Cyclone 3DR est l'outil le plus rapide pour obtenir votre MNT directement à partir de vos nuages de points. Cette fonction extrait les points les plus bas selon une direction donnée pour obtenir un maillage précis et propre. Elle détecte et supprime automatiquement la végétation, les voitures, les panneaux de signalisation, les bâtiments, etc. afin de ne garder que les points qui se trouvent sur le sol à modéliser. [35]

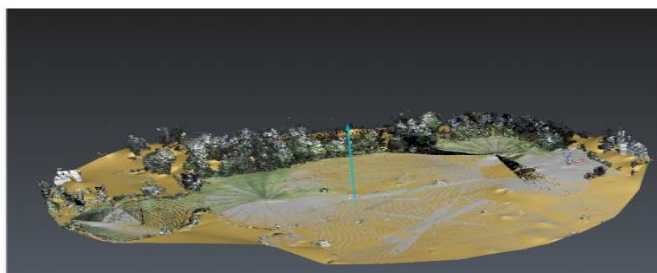


Figure III.1 : Extraction de terrain

III.2.2 Couleur selon une direction

Une fois le modèle numérique de terrain obtenu, il vous est possible d'appliquer une couleur selon une direction afin que les changements d'altitude par exemple soient plus visibles. [35]

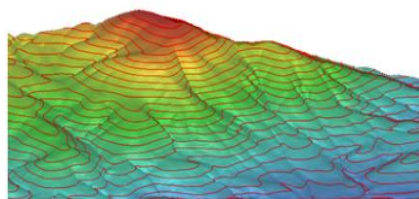


Figure III.2 : Couleur selon une direction

III.2.3 Courbes de Niveaux

Cyclone 3DR vous permet également de calculer extrêmement facilement et rapidement des Courbes de Niveaux et de les exporter dans un fichier .DXF pour les utiliser dans d'autres logiciels complémentaires. [35]

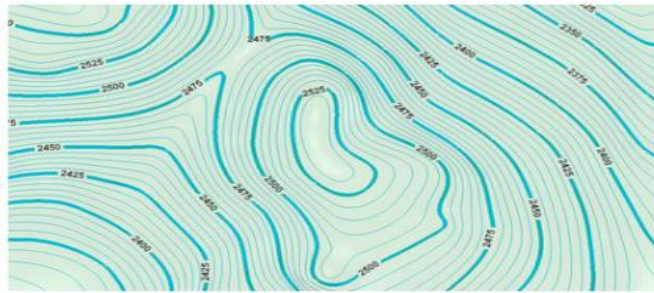


Figure III.3 : Courbes de Niveaux

III.2.4 Lignes de Rupture

Cyclone 3DR rend possible l'extraction massive de lignes de ruptures, mais aussi de bords de route, de trottoirs, etc. sur un maillage. La commande Lignes de Rupture détecte automatiquement les arêtes d'un maillage 3D, qu'elles soient concaves ou convexes. Il est possible d'ajuster la sensibilité de l'extraction, de découper, d'étendre ou bien encore de chaîner les lignes extraites afin d'obtenir le résultat que vous attendez. [35]

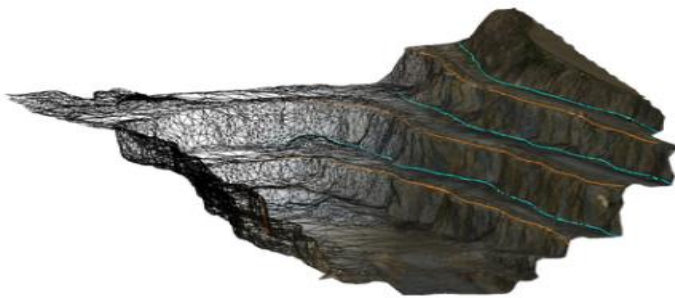


Figure III.4 : Lignes de Rupture

III.3 Présentation de projet université Mohamed Boudiaf - m'sila

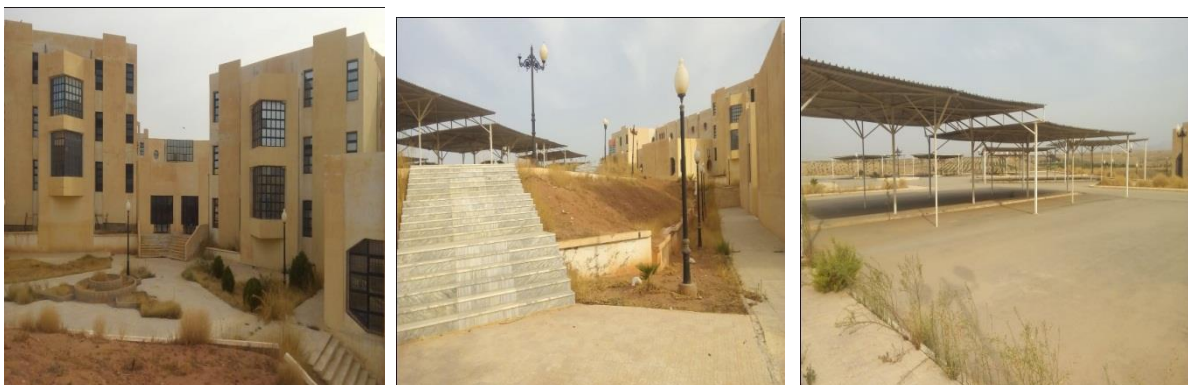


Figure III.5 : Projet université Mohamed Boudiaf - m'sila

III.4 Topographie : Profils

Inspection 3D d'université ou inspection CAO 2D de Bâtiment

- Se familiariser avec l'aspect de votre nuage de points
- Nettoyer ou séparer manuellement le nuage

- Extraction automatique de terrain
- Les détails ici montrent la précision du scanner
- Modifier le mappage des couleurs
- Ajouter des étiquettes d'inspection
- Personnaliser le rapport
- Exporter les résultats

III.5 Inspection 3D d'université ou inspection CAO 2D de Bâtiment

III.5.1 Se familiariser avec l'aspect de votre nuage de points



Figure III. 6 : Nuage de points de projet université Mohamed Boudiaf - m'sila

III.5.2 Nettoyer ou séparer manuellement le nuage

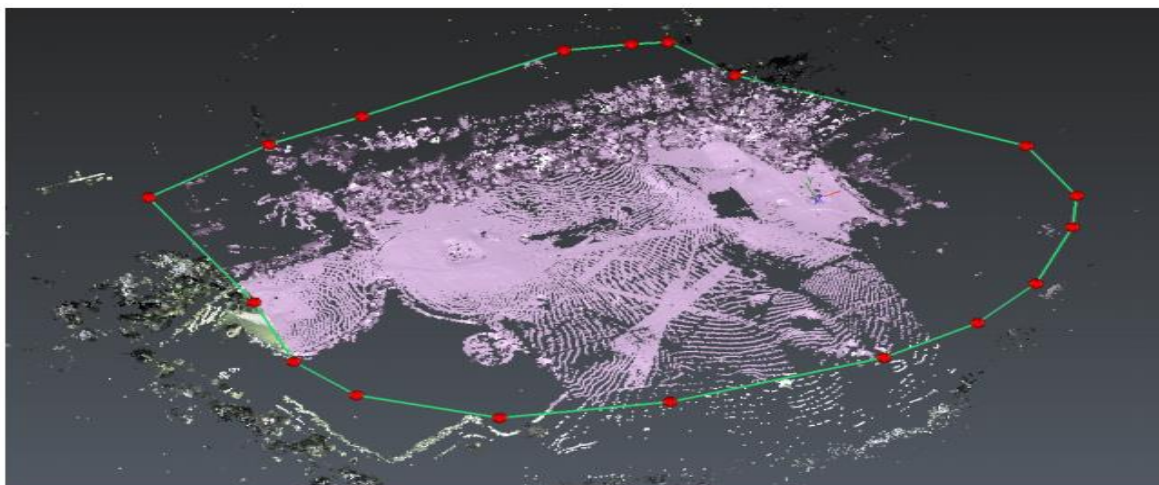


Figure III.7 : Sélectionner manuellement les points pertinents

III.5.3 Extraction automatique de terrain

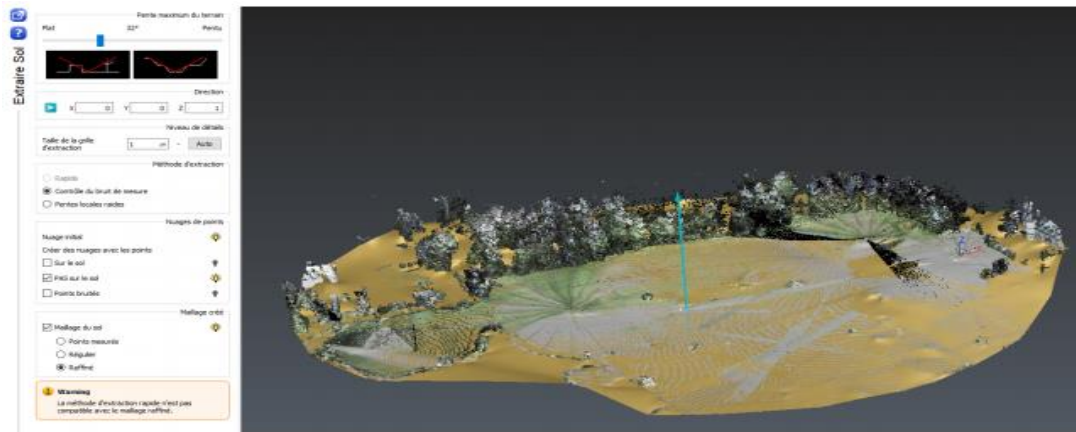


Figure III.8 : Extraction automatique de terrain et maillage 3D

III.5.4 Modifier le mappage des couleurs

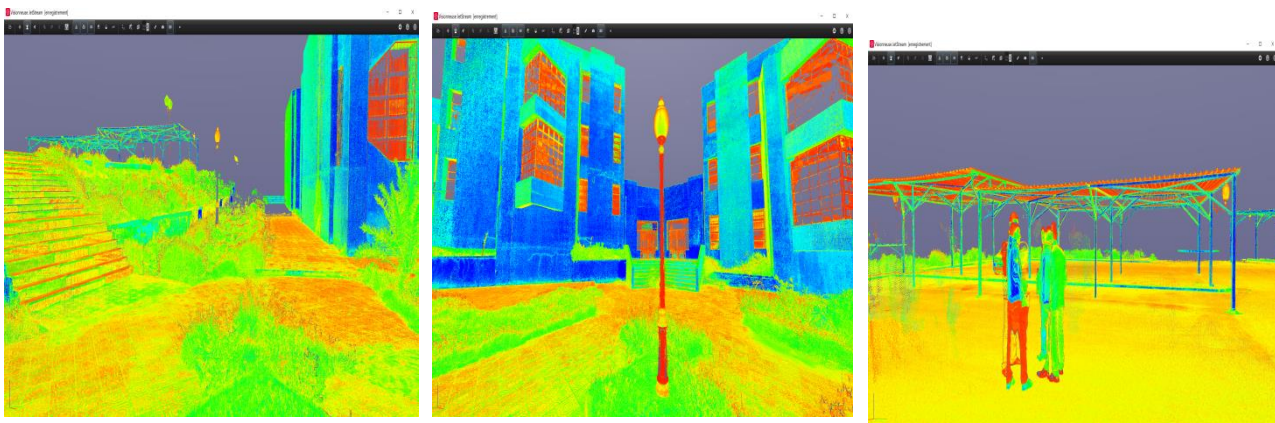


Figure III.9 : Couleur selon l'axe Z université Mohamed Boudiaf - m'sila

III.5.5 Les détails ici montrent la précision du scanner

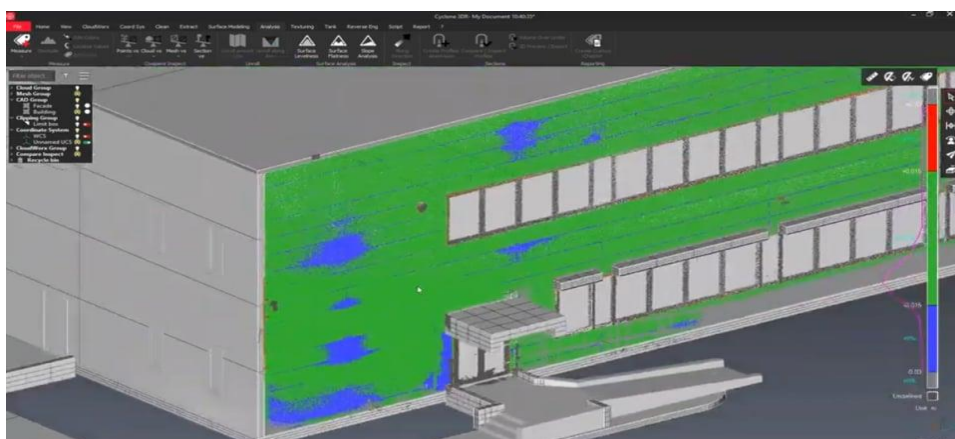


Figure III.10 : Les détails du scanner

III.5.6 Ajouter des étiquettes d'inspection

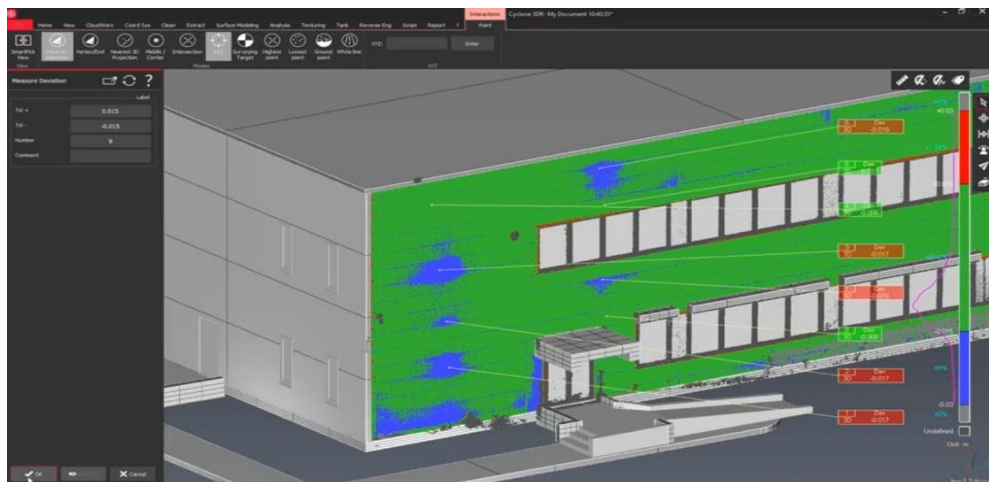


Figure III.11 : Ajouter des étiquettes

III.5.7 Personnaliser le rapport

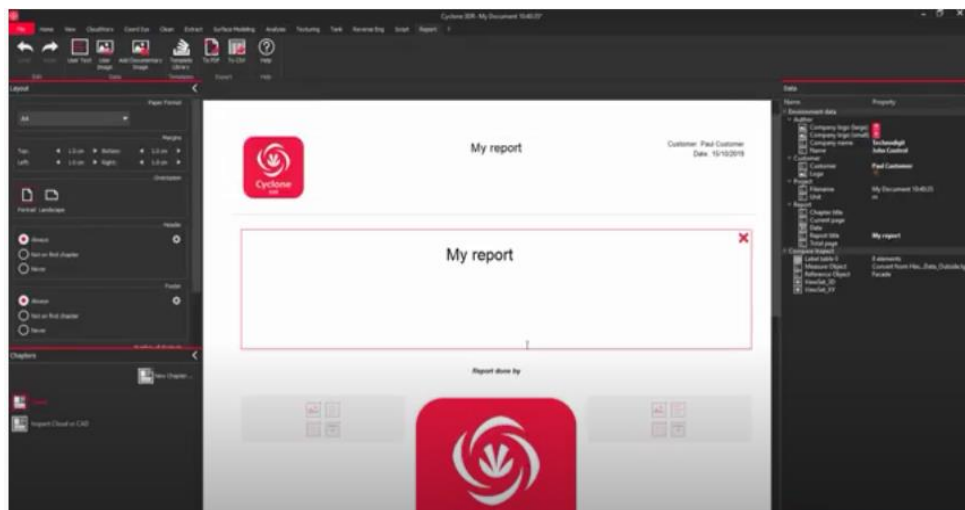


Figure III.12 : Personnaliser le rapport

III.5.8 Exporter les résultats sous forme de tableau

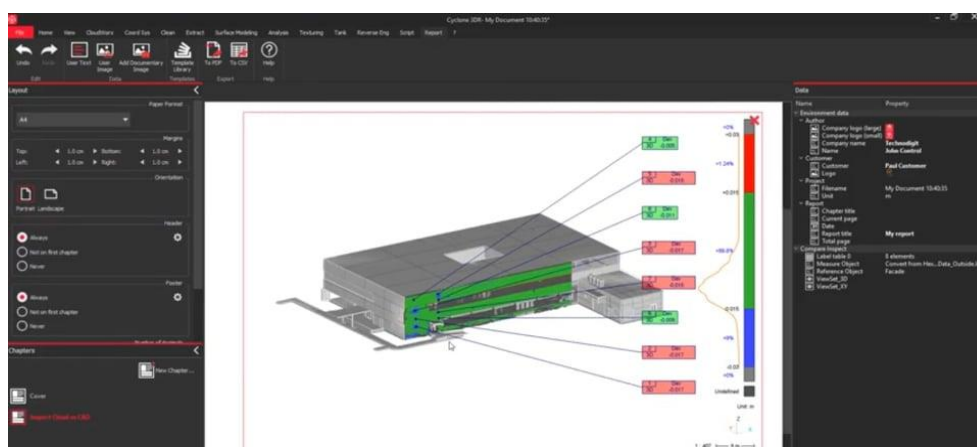


Figure III.13 : Exporter les résultats

III.6 Exemple Calcule des volumes Dans logicielle Cyclone3DR

Dans le logiciel, vous pouvez calculer un volume dans différentes situations :

- Volume d'une surface fermée
- Volume au-dessus ou en-dessous d'un certain niveau
- Volume entre deux surfaces superposées

III.7 Une image de Projet Calcule des volumes

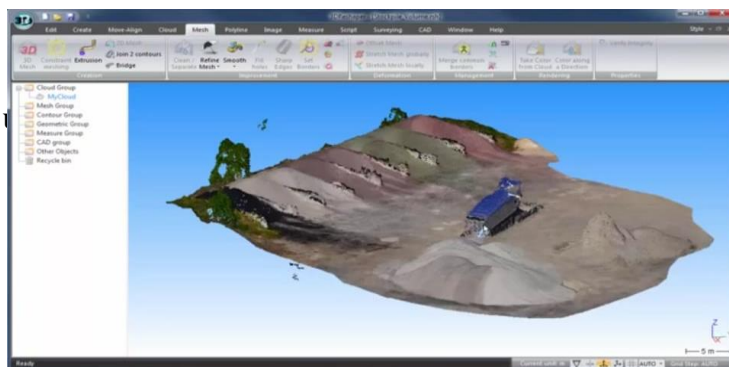


Figure III.14: Projet Calcule des volumes

III.8 Étapes de l'opération Calcul des volumes

III.8.1 Importe les scans (Ouvre le fichier).

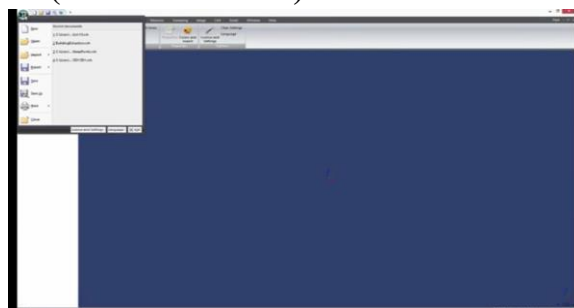


Figure III.15 : méthode Ouvre le fichier

III.8.2 Nettoyer le nuage de points

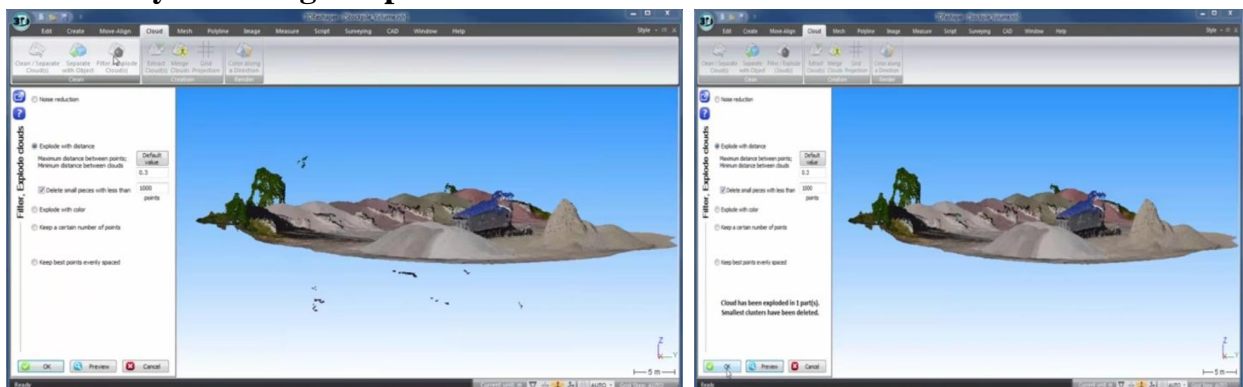


Figure III.16: Nettoyer le nuage de points Avant et après

III.8.3 Créer maillage3D

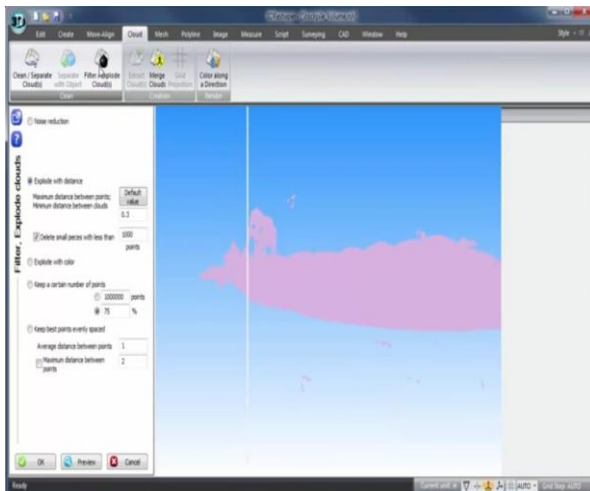


Figure III.17 : Création d'un maillage 3D

III.8.4 Fermer le maillage

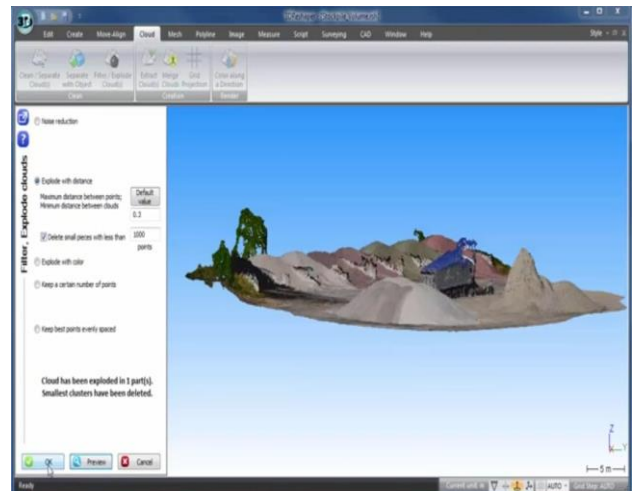


Figure III.18 : Fermer le maillage

III.8.5 Erreur d'écart affiné

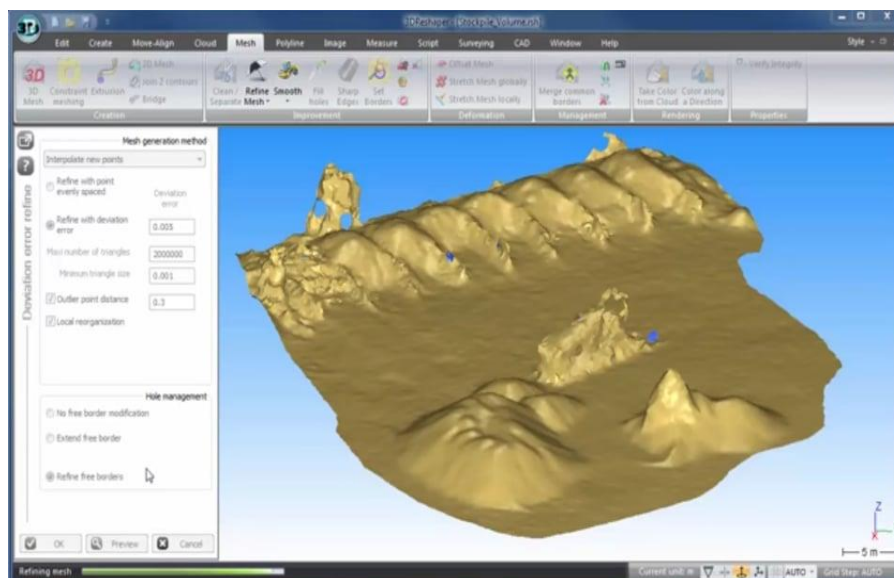


Figure III.19 : Création d'un maillage3D final du terrain naturel

III.8.6 Tracer les limites stock

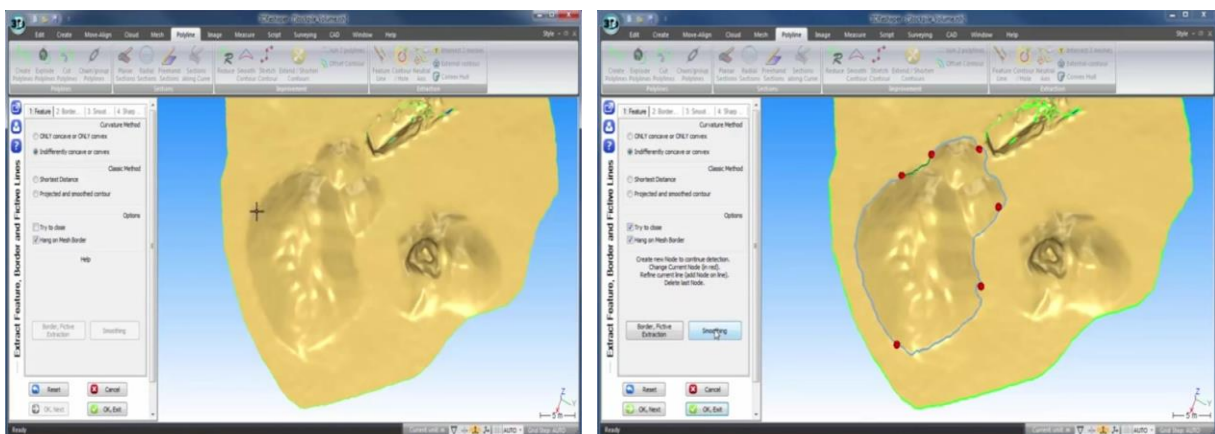


Figure III.20 : Tracer les limites stock avant et après

III.8.7 Couper le stock

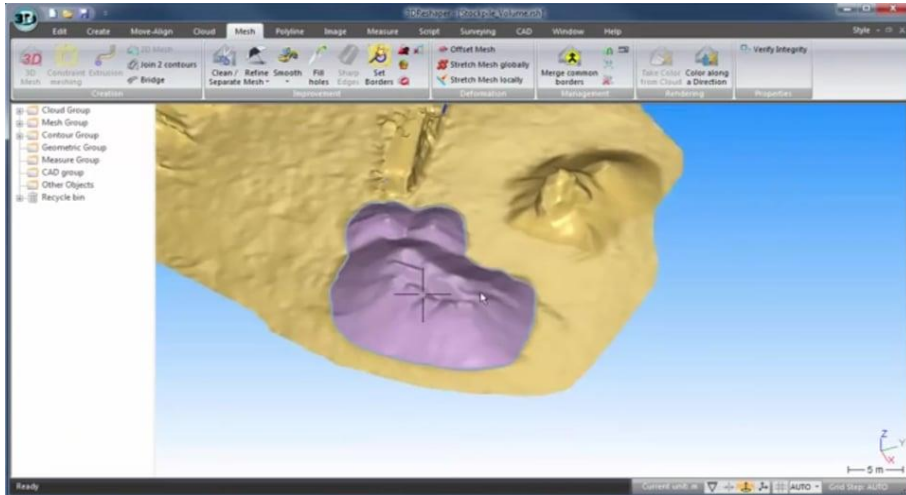


Figure III.21 : Maillage inspecté

III.8.8 Fermer le maillage

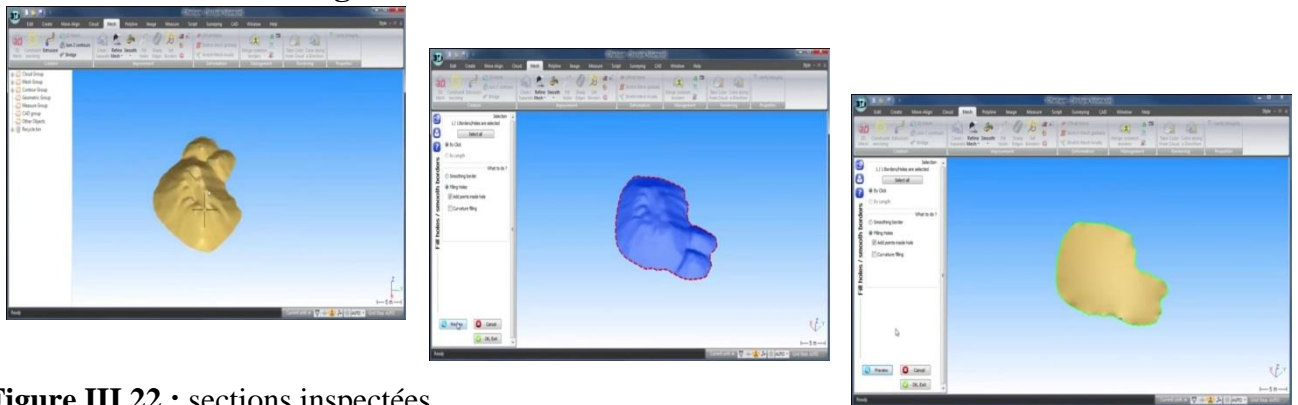


Figure III.22 : sections inspectées

III.8.9 Mesurer le volume

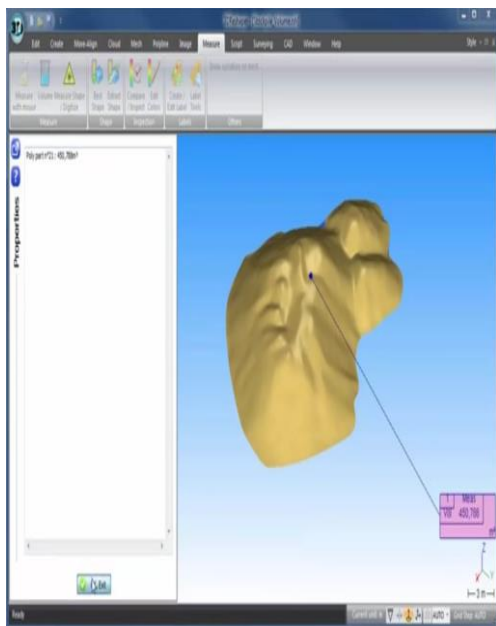


Figure III.23 : Mesurer le volume

III.8.10 Tracer les limites d'un autre stock

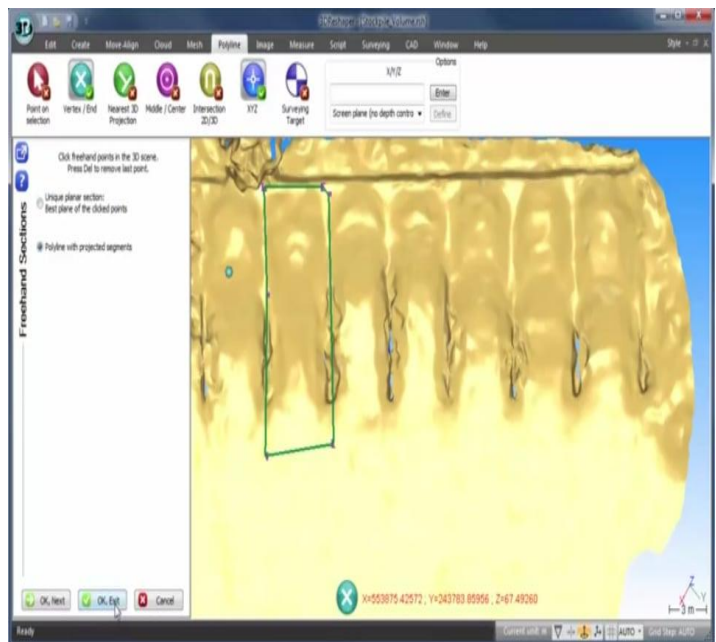


Figure III.24 : Création d'un maillage du terrain naturel

III.8.11 Couper d'un autre stock

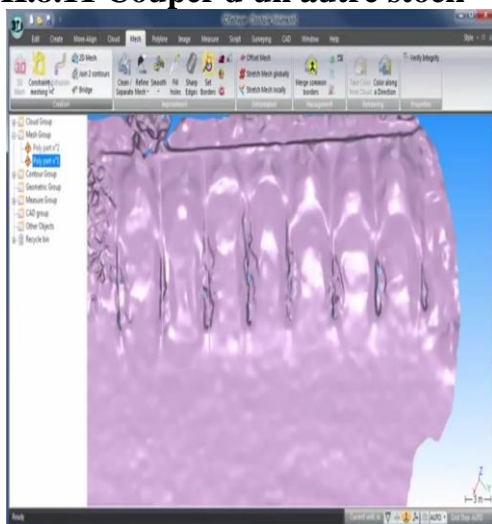


Figure III.25 : Maillage inspecté

III.8.12 Calcule le volume sur un niveau donné

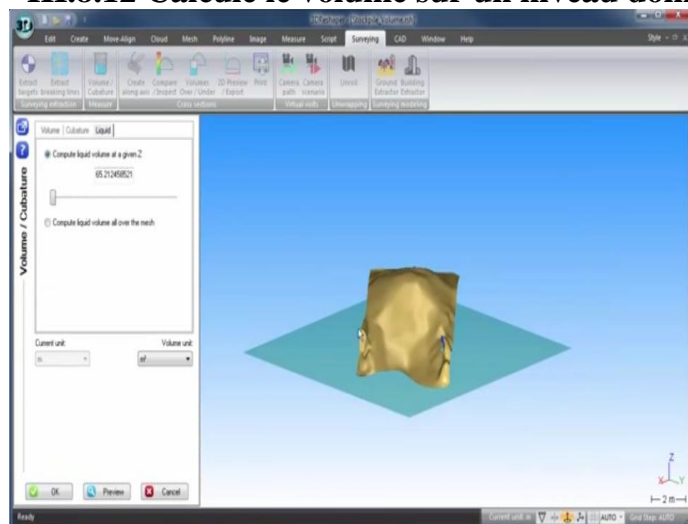


Figure III.26 : Le volume sur un niveau

III.8.13 Choisir l'unité pour le volume

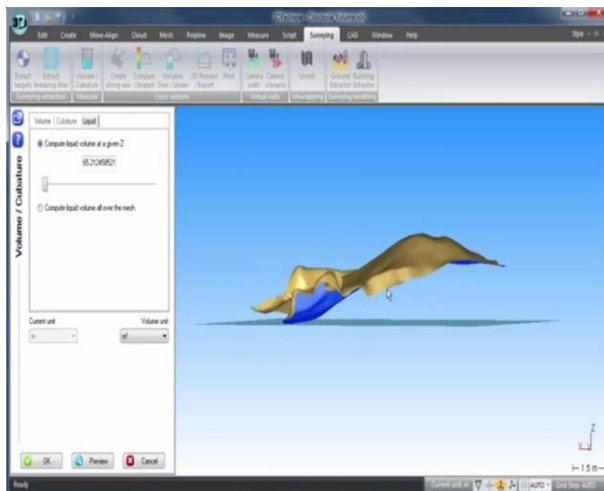
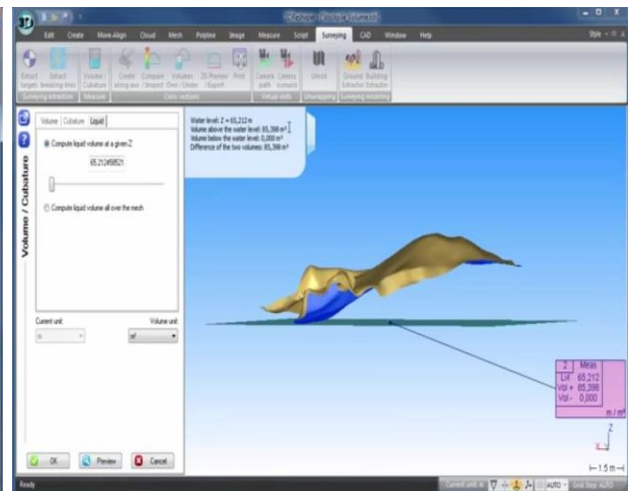


Figure III.27 : Volume au-dessus/au-dessous du niveau



III.8.14 Projet Calcul du volume entre deux surfaces différentes niveaux



Figure III.28 : Calcul du volume entre deux surfaces différentes niveaux

III.8.15 Projet final avec maillage texturé

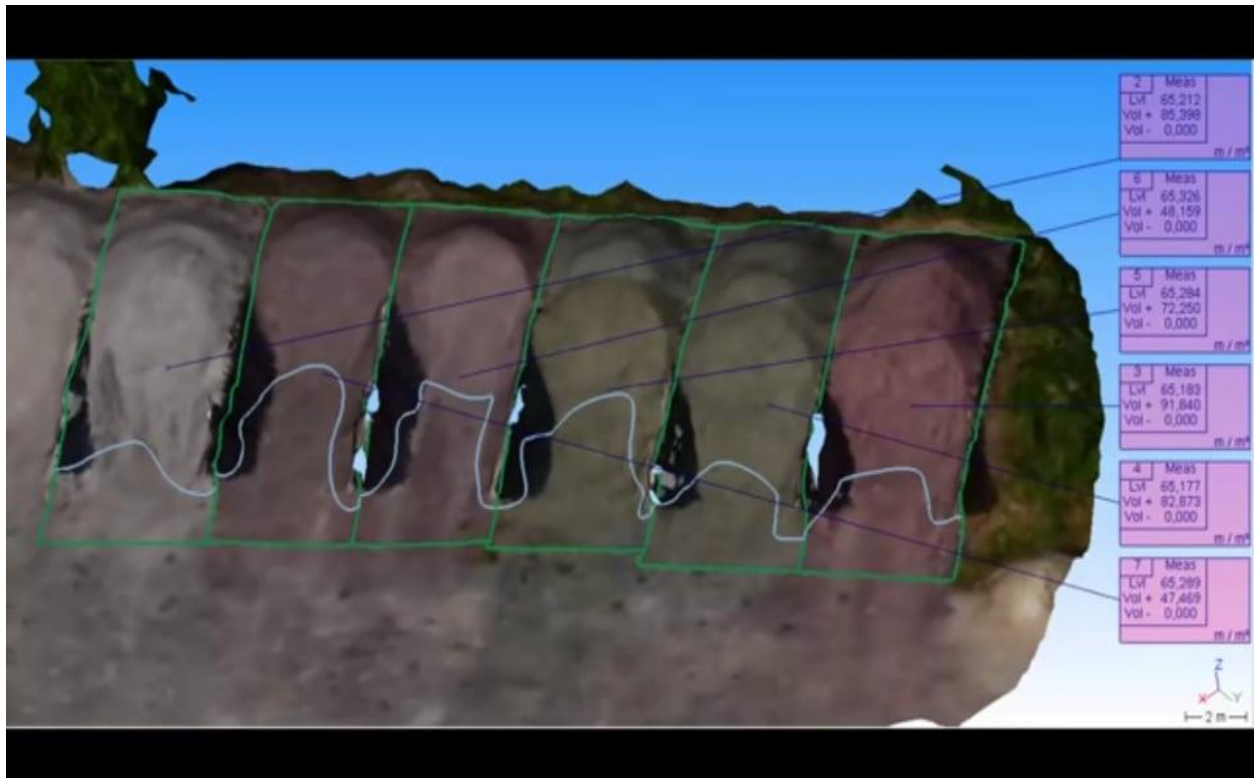


Figure III.29 : Calcul du volume à différents niveaux

III.8.16 Tous les volumes avec maillage coloré le long de l'élévation

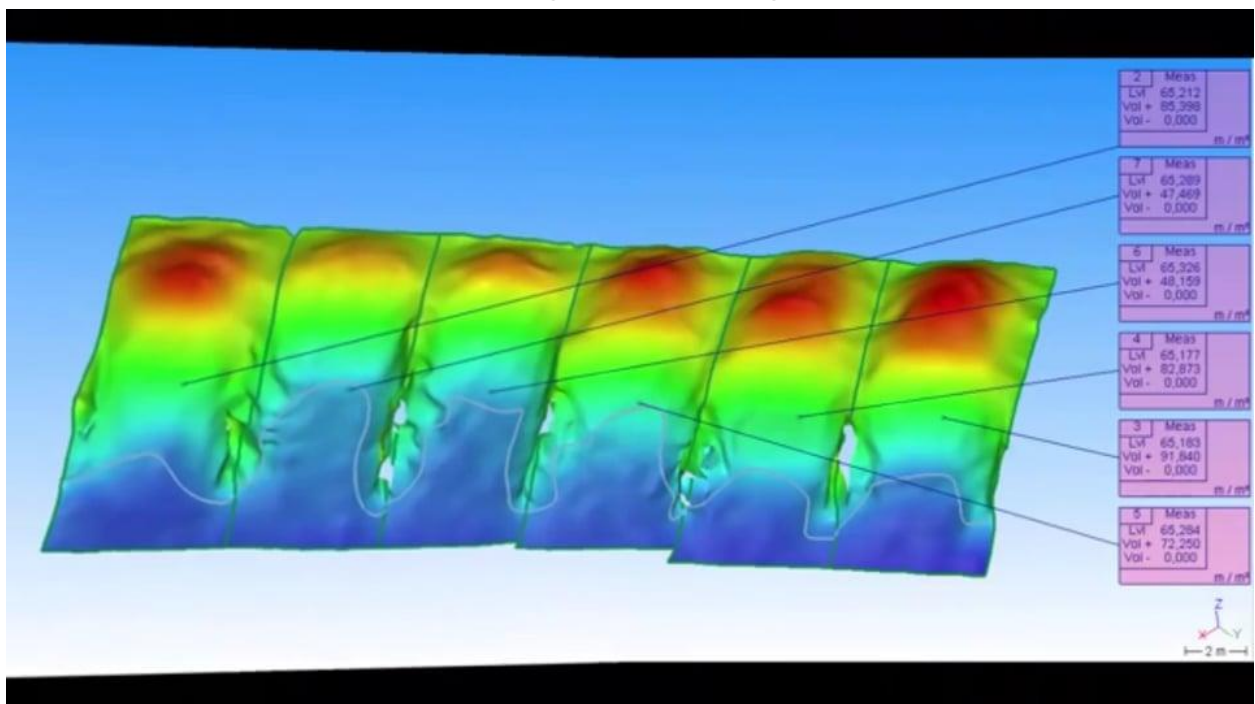


Figure III.30 : Calcul du volume à différents niveaux avec maillage coloré

III.9 Comparatif entre La méthode analogique et la méthode numérique

Nous avons donc pu tester deux processus de levé : la méthode traditionnelle et le scanner 3D. Dans cette partie, nous allons comparer ces différentes techniques de levé de façon objective.

La méthode traditionnelle : est la moins coûteuse en investissement matériel (2 119€). Cet achat peut être considéré comme nul car tous les cabinets de GE possèdent déjà le matériel nécessaire. En revanche, cette technique est longue à mettre en œuvre (2 jours et demi), et de ce fait le prix facturé au client sera important (1 500€). Enfin, la précision médiocre de cette méthode (5 à 15 cm) s'explique par le fait que l'assemblage des pièces lors du report est source d'un grand nombre d'erreurs commises par le technicien.

Le scanner 3D : est la plus innovante des méthodes testées. Le scanner 3D permet de lever l'ensemble du bâtiment en une seule journée ! L'investissement de 44 895€ est rentabilisé assez rapidement par l'efficacité du procédé et par la polyvalence d'un scanner 3D. Comme pour la méthode tachéométrique, 2 jours suffisent à réaliser un rendu 2D détaillé (plan d'intérieur + coupes verticales) et plus précis (± 1 cm). De plus, la possibilité de créer une visite virtuelle des lieux permet de vendre ce nouveau produit aux clients qui le désirent. La réalisation d'un levé au scanner 3D est facturée 1 400€ au client, ceci s'explique par le coût d'investissement et par la nouveauté de cette technologie.

Au vu des techniques maîtrisées par les géomètres, la solution qui convient le mieux aux architectes est la réalisation du levé avec un scanner 3D. Le temps passé sur le terrain lors de la prise des mesures est minime par rapport au nombre d'informations enregistrées. De plus, le processus de conception de plan 2D est simple et rapide grâce à l'utilisation de « PointCloud ».

Conclusion

Cette méthode de levé topographique est un outil très puissant et particulièrement intéressant pour établir à un instant T l'état d'un ouvrage, pour mettre en évidence les désordres présents (recensement exhaustif et quantification très précise) et également pour mettre en place un suivi fin de ce type d'ouvrages. C'est une technologie en plein développement. Les constructeurs de scanners 3D se livrent actuellement une course au système le plus rapide, le plus précis ou ayant la plus grande portée : certains sont capables d'enregistrer 500 000 points à la seconde, d'autres portent à plus de 6000m. Notons aussi l'émergence très prometteuse de systèmes mobiles, capables d'enregistrer en quelques heures ce qu'un scanner terrestre statique met encore quelques jours à numériser. Cependant, les plus grands progrès restent à faire du côté des logiciels courant du type Autocad, afin qu'ils soient rapidement capables de prendre en charge

les millions de points d'une campagne de mesure pour offrir aux bureaux d'études toute liberté d'exploitation. Cela ne saurait tarder.

Conclusion générale

Le levé topographique avec scanner 3D est la solution la plus adaptée. Cette méthode permet de produire un plan précis et détaillé, mais aussi des coupes verticales et une visite virtuelle des lieux. Le temps de prise des mesures et de production des différents plans est intéressant car ils sont plus précis et plus détaillés. De plus, la livraison d'une visite virtuelle à un architecte est un vrai avantage pour lui, celle-ci lui évitant de se rendre souvent sur le terrain pour prendre des cotes complémentaires. L'avenir du levé est dans cette technologie qui est de en plus utilisée par les géomètres. Cette solution séduit par son efficacité et sa capacité à ouvrir de nouveaux marchés.

Les grands chantiers ne se limitent pas à des constructions neuves. La réhabilitation de bâtiments est en plein essor. Le scanner laser 3D est alors utilisé lors du relevé de l'existant. Son exhaustivité et sa simplicité de mise en œuvre sont des atouts indéniables. Les phases d'acquisition et de traitement sont généralement bien maîtrisées.

Le nuage de points issu du relevé scanner laser 3D constitue la base pour la modélisation du bâtiment et créer une maquette numérique en vue d'une application BIM. Seulement, de nos jours, la majorité des acteurs n'utilise pas le nuage de points à sa juste valeur. L'enjeu majeur est donc d'exploiter pleinement les informations présentes dans le nuage de points de manière automatique.

L'étude des différents logiciels de traitement et de modélisation indique qu'ils ne sont pas encore adaptés et ne proposent pas d'outils spécifiques pour travailler directement sur les points du nuage afin de créer une maquette numérique. Des outils complémentaires d'automatisation sont disponibles. Ils présentent tout de même quelques imperfections. Cependant, les solutions proposées par les éditeurs évoluent très rapidement. De nouvelles innovations sont proposées chaque année. On peut donc espérer une réelle évolution dans les années à venir.

Afin de répondre aux besoins du service topographie, une solution d'automatisation permettant la détection et la création de murs a été réalisée à travers le développement de plug-in dans le logiciel Revit.

La détection et la création automatique des niveaux et des murs à partir d'un nuage de points sont des étapes primordiales lors de la réalisation d'une maquette numérique 3D en cas de réhabilitation. Ensuite, les coordonnées des murs sont exportées et dessinées dans Revit. L'étude des résultats démontre une modélisation de bonne qualité avec l'utilisation du plug-in.

Seulement, il faut garder à l'esprit qu'une automatisation complète pour la création d'une maquette numérique est aujourd'hui impossible. Il est peu probable qu'elle le soit dans un futur proche. Beaucoup de paramètres sont nécessaires et certains doivent être renseignés par l'utilisateur. Cependant, l'outil développé contribue grandement à l'automatisation de la création d'une maquette numérique 3D à partir d'un relevé au scanner laser 3D.

Le BIM va devenir un standard dans le secteur du bâtiment. Il est donc important de se préparer dès maintenant à son utilisation et à la création de sa maquette numérique associée. Nous pourrions nous mettre à rêver de la création automatique de la modélisation avec les différentes propriétés des éléments. Ces derniers pourraient être vérifiés et mis à jour en direct grâce à la réalité augmentée.

D'un point de vue personnel, cette expérience fut très enrichissante. Elle m'a permis d'aborder un domaine que je connaissais très peu, celui du bâtiment. J'ai ainsi pu apprendre de nouvelles méthodes de travail et découvrir de nouvelles perspectives dans le métier de géomètre.

Le processus du BIM ainsi que l'exploitation de données 3D sont des sujets d'actualité. Je pense sincèrement qu'ils sont l'avenir du métier. Ce fut très intéressant de les traiter. De plus, l'aspect recherche bibliographique et test des différents logiciels disponibles m'ont permis d'acquérir les connaissances essentielles pour traiter et modéliser des données 3D.

J'ai également pris conscience de l'importance des études de recherche et de développement d'outils pour permettre l'automatisation de tâches. La communauté de développeurs grandit sans cesse et il est primordial de la suivre pour avoir les meilleurs outils et méthodes. Ce travail m'a permis de développer encore plus mon goût pour la recherche et le développement.

Références bibliographiques

- [1] Jean-Yves Ramelli. BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction ; 2eme édition ; Groupe Eyrolles et CSTB, 2014, 2015
- [2] Image Google
- [3] Jean-Baptiste HENRY cours-de-topographie-et-topometrie-generale.pdf
- [4] Dr. KAID Nouria. Polycopie de topographie Partie I Notions de bases.pdf
- [5] Pr. Mohammed ESSADIKI topographie générale.pdf
- [6] [<http://www.objectif-bim.com>]
- [7] MICHEL BRABANT Topographie opérationnelle.pdf
- [8] Bertrand CHAZALY, David LHOMME, Yvan ROBIN, Simon FAGES, Stéphane GUBERT. Le levé topographique haute densité par scanner laser 3D appliqué au génie côtier.pdf
- [9] ESKAL EUREKA. Méthode de relevé de bâtiment au scanner laser 3D dans un processus BIM.pdf
- [10] S. KESTELOOT. Cours de Topographie Partie 1 Généralités et Nivellement.pdf
- [11] Mathieu Koehl, Elise Meyer, Chokri Koussa, C. Lott. SIG 3D ET 3D dans les SIG : Application aux modèles patrimoniaux. Apr 2008, France.
- [12] Samson Romain ; mémoire de projet de fin d'études *La place du BIM cœur du chantier: nouveaux rôles et nouveaux outils, INSA.
- [13] <https://bimbtpr.com/decouvrir-le-bim/les-lourdes-consequences-du-bim/>
- [14] [<https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/blk360>]
- [15] [<https://shop.leica-geosystems.com/fr/fr-FR/buy/accessories/blk360-mission-kit>]
- [16] Flyer Leica BLK360.FR.pdf
- [17] [<https://abtech.cc/produits/leica-rtc-360/>]
- [18] [<https://leica-geosystems.com/fr-be/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40-p30>]
- [19] [<https://www.krinc.net/6012673.html>]
- [22] [<https://www.directindustry.fr/prod/leica-geosystems/product-14324-810467.html>]
- [23] [<https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/construction-tps-and-gnss/robotic-total-stations/leica-icon-robot-60>]
- [20] Rémy BOUDON, Philippe REBUT, Florian MAURIS. Les nouvelles techniques topographiques 3d surfaciques pour optimiser le suivi des ouvrages hydrauliques.pdf
- [24] [<https://fr.mep.trimble.ch>]
- [25] Maxime Renaud. Création automatique d'une maquette numérique 3D d'un bâtiment à partir d'un relevé scanné laser 3D. Sciences de l'ingénieur [physiques]. 2016.
- [26] Danielle Monfet, ing. Ph.D. BIM pour la vie... de votre immeuble!, 6 avril 2016
- [27] A Introduction to Building Information Modeling (BIM) A Guide for ASHRAE Members, Revised November 3, 2009.

- [28] Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : Reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants, 30 janvier 2017
- [29] Le relevé 3D à l'heure du BIM, Octobre 2018
- [30] [www.buildingsmart.com]
- [31] The guide to Building Information Modelling, Edition 2015
- [32] Le relevé géométrique à haute définition, Mars 2017
- [33] [<https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr>]
- [34] [<https://www.esrifrance.fr/leica-geosystems.aspx>]
- [35] [<https://www.3dreshaper.com/fr/>]
- [36] Dr T. VANDENBERGH L'utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM

