

Année universitaire **2018-2019**

SCAN 3D: NUMERISATION, MODELISATION ET DOE  
NUMERIQUE – MISE EN PLACE ET APPLICATION AU SEIN  
DU PROJET EOLE (RER E)

SCAN 3D: DIGITIZATION, MODELING AND  
DIGITAL FEW – SET UP WITHIN THE EOLE  
PROJECT (REN E)

Mémoire de recherche présenté par **SOLEIL, KAUMBA LUNGU**

Sous la direction d'**EMERIC DE GAULLIER**, Responsable Topographie & Auscultation sur le chantier EOLE GC TUN à Courbevoie, **YASSINE HASSANI**, Professeur de Topographie à l'ESTP Paris et **ISRAEL QUINTANILLA GARCIA** Professeur d'ingénierie aérospatiale et géomatique à l'Université Polytechnique de Valence.

Mémoire de Travail de fin d'études

3<sup>e</sup> Année ESTP

Option Aménagement de la propriété



## RESUME

Pour améliorer le dossier des ouvrages exécutés (DOE), l'utilisation du scan 3D sur le chantier EOLE du prolongement du Réseau Express Régional E (RER E) de HAUSSMANN ST-LAZARE à COURBEVOIE sur 6.1 km a été mise en place. Afin de connaître l'efficacité du nouvel instrument, des campagnes de scan 3D sont réalisées et les nuages de points obtenus en sortie sont exploités pour le récolement des ouvrages exécutés et existants.

L'objectif de cette étude est de mettre en place une procédure pour l'exploitation des nuages de points des ouvrages exécutés et existants. La problématique est par conséquent la suivante : *Comment mettre en place une procédure d'assemblage, analyse et modélisation d'un nuage de points pour le DOE numérique tout en respectant le planning établi ?*

Pour répondre à la problématique, une série de tests sur les fonctionnalités des logiciels d'exploitation des nuages de points a été réalisée. Une liste des logiciels a été définie après échanges avec des commerçants et autres ingénieurs topographes. Les solutions trouvées montrent que le scan 3D apporte plus d'information qu'un levé topographique classique. Ces résultats indiquent que l'utilisation du scan 3D sur le chantier va croître.

## ABSTRACT

To improve the folder of executed works (FEW), the use of 3D scanning on the EOLE site of the extension of the Regional Express Network E (RER E) from HAUSSMANN ST-LAZARE to COURBEVOIE over 6.1 km has been set up. In order to know the effectiveness of the new instrument, 3D scanning campaigns are carried out and the point clouds obtained at the output are used to collect the executed and existing structures.

The objective of this study is to set up a procedure for the exploitation of the point clouds of the executed and existing structures. The problem is therefore as follows: *How to set up a procedure for assembling, analyzing and modeling a point cloud for digital FEW while respecting the established schedule?*

To answer the problem, a series of tests on the functionalities of point cloud operating software were carried out. A list of software was defined after discussions with merchants and other survey engineers. The solutions found show that 3D scanning provides more information than a conventional topographic survey. These results indicate that the use of 3D scanning on site will increase.

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier le responsable du service Topographie du chantier EOLE Emeric DE GAULLIER, son adjoint Florent ABRAHAM ainsi que tout le reste de l'équipe pour m'avoir accueilli au sein du groupe et avoir contribué dans l'aboutissement de mon travail.

Je remercie également mon tuteur en école, Yassine HASSINI pour sa disponibilité et ses conseils tout au long de ma période de stage.

Enfin, je remercie les divers services du chantier (BIM, Méthodes, Auscultation et Travaux) pour leurs conseils et encouragements qui ont été d'une grande aide.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements et mon respect.

# TABLE DES MATIERES

Résumé .....	0
Abstract.....	0
Remerciements.....	0
Liste des figures .....	3
Table des annexes.....	7
Liste d'Abréviations et Acronymes .....	8
1. INTRODUCTION .....	9
INTRODUCTION (anglais).....	10
2. OBJECTIFS.....	11
3. PRESENTATION ORGANISME D'ACCUEIL .....	12
3.1. BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS.....	12
3.2. Le projet EOLE .....	13
3.2.1. Maître d'ouvrage.....	15
3.2.2. Maître d'œuvre .....	16
3.2.3. Principaux acteurs et chiffres clés .....	16
3.3. Le service Topographie .....	19
3.3.1. Moyen humain.....	19
3.3.2. Moyen matériel .....	21
3.3.3. Moyen logiciel .....	23
4. DEVELOPPEMENT ET ANALYSE DU SCAN 3D SUR EOLE.....	24
4.1. Problématique et objectifs.....	24
4.1.1. Problématique .....	24
4.1.2. Objectifs.....	24
4.1.2.1. Analyse comparative entre le théorique (modèle 3D) et le mesuré (nuage de points) .....	24
4.1.2.2. Analyse comparative entre deux nuages de points du même objet scanné .....	24
4.1.2.3. Analyse des profils.....	25
4.2. Définition du plan d'action.....	25
4.2.1. Logiciels identifiés .....	25
4.2.2. Planning.....	26
4.3. Scan 3D : Exploitation des nuages de points.....	27
4.3.1. Méthode DE numérisation 3D sur EOLE.....	28
4.3.1.1. Terrain.....	28
4.3.1.2. Post-Traitement : FARO SCENE.....	29
4.3.2. FARO AS-BUILT .....	38
4.3.2.1. Modélisation.....	39
4.3.2.2. Analyse.....	42
4.3.3. POLYWORKS METROLOGY .....	46

4.3.3.1.	Modélisation.....	47
4.3.3.2.	Analyse.....	47
4.3.4.	BUILDIT CONSTRUCTION.....	49
4.3.4.1.	Assemblage.....	49
4.3.4.2.	Modélisation.....	50
4.3.4.3.	Analyse.....	50
4.3.5.	TRIMBLE REALWORKS.....	54
4.3.6.	AMBERG TUNNEL.....	55
4.3.6.1.	Analyse.....	55
4.3.7.	3D RESHAPER.....	62
4.3.7.1.	Assemblage.....	62
4.3.7.2.	Modélisation.....	64
4.3.7.3.	Analyse.....	64
4.4.	Comparaison des résultats d'analyse.....	72
4.4.1.	Précision d'analyse des logiciels.....	72
4.4.2.	Conclusion sur l'utilisation des logiciels.....	80
5.	LA TOPOGRAPHIE EN TUNNEL.....	81
6.	CONCLUSION.....	83
	CONCLUSION (anglais).....	84
7.	BIBLIOGRAPHIE.....	85
8.	ANNEXES.....	86

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Arbre hiérarchique BYTP.....	12
Figure 2. Répartition de BYTP à travers le monde. ....	13
Figure 3. Emplacement bureaux chantier GAMBETTA. ....	14
Figure 4. Vue en plan du projet EOLE. ....	14
Figure 5. Vue en plan lot GC-TUN.....	15
Figure 6. Société Nationale des Chemins de Fer français.....	15
Figure 7. Maîtrise d'Œuvre du lot GC-TUN. ....	16
Figure 8. Groupement d'entreprises. ....	16
Figure 9. Organigramme des principaux acteurs du projet.....	17
Figure 10. GPM : vue sur les transports existants. ....	17
Figure 11. Vue sur les différents ouvrages et trace du tunnelier.....	18
Figure 12. Cheminement de la conduite de marinage.....	19
Figure 13. Organigramme du service Topographie. ....	20
Figure 14. Leica TS60 .....	21
Figure 15. Leica TS16 .....	21
Figure 16. Fiche technique Leica TS60. ....	21
Figure 17. Fiche technique Leica TS16. ....	21
Figure 18. Fiche technique Topcon GT.....	22
Figure 19. Station totale Topcon GT.....	22
Figure 20. Faro FOCUS S150.....	22
Figure 21. Fiche technique FOCUS S150.....	22
Figure 22. Fiche technique Leica LS15.....	23
Figure 23. Leica LS15.....	23
Figure 24. Faro AS-BUILT. ....	25
Figure 25. Faro SCENE.....	25
Figure 26. Faro AS-BUILT. ....	26
Figure 27. AMBERG TUNNEL.....	26
Figure 28. TRIMBLE REALWORKS.....	26
Figure 29. POLYWORKS.....	26
Figure 30. 3D RESHAPER.....	26
Figure 31.Planning de travail.....	27
Figure 32. Procédure de géoréférencement scan sur EOLE.....	28
Figure 33. Prisme boule. ....	29
Figure 34. Sphère d'assemblage.....	29
Figure 35. Caractéristiques prisme boule. ....	29
Figure 36. Caractéristiques sphère d'assemblage.....	29

Figure 37. Plaque métallique. ....	29
Figure 38. Espace de travail SCENE.....	30
Figure 39. Interface import données SCENE.....	30
Figure 40. Scans bruts au format FLS.....	30
Figure 41. Procédure de traitement et géoréférencement des scans sur SCENE.....	31
Figure 42. Interface ATS QUALITY MANAGER.....	32
Figure 43. Code couleur-qualité ATS QUALITY MANAGER.....	33
Figure 44. Vue 3D des scans et points de refereneces.....	34
Figure 45. Angles entre points de référence et position PF005.....	34
Figure 46. Interface Orthographic.....	34
Figure 47. Délimitation zone pour l'orthophoto.....	35
Figure 48. Orthophoto Puit Frontal.....	35
Figure 49. Interface SendToRevit.....	35
Figure 50. Vue sur voile du parking palais des congrès à porte maillot.....	36
Figure 51. Voile modélisé à partir du nuage de point.....	36
Figure 52. Rapport statistiques des cibles sur SCENE.....	37
Figure 53. Espace de travail Faro AS-BUILT.....	38
Figure 54. Outil d'analyse de surface AS-BUILT.....	38
Figure 55. Outils de modélisation As-built.....	38
Figure 56. Vue en plan du modèle 3D du parking palais des congrès à porte maillot.....	39
Figure 57. Paramètres ajustement des murs AS-BUILT.....	39
Figure 58. Résultats ajustements des murs AS-BUILT.....	40
Figure 59. Niveau N-6 modélisé à partir du nuage de point.....	40
Figure 60. Nuage de points des piliers à modéliser.....	41
Figure 61. Paramètres de modélisation des structures.....	41
Figure 62. Piliers modélisés du niveau N-6 du parking palais des congrès.....	41
Figure 63. Vue en plan sur Puit Frontal.....	42
Figure 64. Vue en plan sur paroi moulée analysée.....	42
Figure 65. Vue en élévation du nuage de point sur modèle 3D de la paroi moulée.....	43
Figure 66. Paramètres configuration d'analyse AS-BUILT étape 2.....	43
Figure 67. Paramètres configuration d'analyse AS-BUILT étape 1.....	43
Figure 68. Résultat d'analyse AS-BUILT.....	44
Figure 69. Echelle des couleurs analyse AS-BUILT.....	44
Figure 70. Coupe sur paroi moulée PF.....	45
Figure 71. Vue en plan sur paroi moulée PF.....	45
Figure 72. Interface POLYWORKS.....	46
Figure 73. Polyworks Inspector-Modeler.....	46
Figure 74. Analyse puit de passage P6.....	47
Figure 75. Espace de travail BUILDIT.....	49



Figure 76. Résultat du maillage sur BUILDIT.....	50
Figure 77. Vue sur nuage de points du Puit Frontal sur BUILDIT.....	51
Figure 78. Configuration des paramètres d'analyse étape 3.....	51
Figure 79. Configuration des paramètres d'analyse étape 2.....	51
Figure 80. Configuration des paramètres d'analyse étape 1.....	51
Figure 81. Résultat d'analyse du Puit frontal BUILDIT.....	52
Figure 82. Affichage échelle des couleurs par plages.....	52
Figure 83. Affichage échelle des couleurs par dégradé.....	52
Figure 84. Interface TRIMBLE REALWORKS.....	54
Figure 85. Espace de travail AMBERG TUNNEL.....	55
Figure 86. Vue en plan de l'axe définit sur AMBERG TUNNEL.....	56
Figure 87. Arborescence de travail sur AMBERG TUNNEL.....	56
Figure 88. Profil en long de l'axe définit sur AMBERG TUNNEL.....	56
Figure 89. Définition des paramètres géométriques des profils appliqués sur le long de l'axe.....	57
Figure 90. Formats de fichiers supportés par AMBERG TUNNEL.....	57
Figure 91. Résultat d'importation des mesures d'une station totale sur AMBERG TUNNEL.....	58
Figure 92. Paramètres d'importation du nuage de points sur AMBERG TUNNEL.....	58
Figure 93. Résultat d'importation du nuage de points sur AMBERG TUNNEL.....	59
Figure 94. Résultat de l'analyse des profils sur AMBERG TUNNEL.....	59
Figure 95. Espace de travail AMBERG TUNNELSCAN.....	60
Figure 96. Espace de travail 3D RESHAPER.....	62
Figure 97. Assemblage par Best-fit sur 3D RESHAPER.....	63
Figure 98. Résultat d'assemblage par Best-fit sur 3D RESHAPER.....	63
Figure 99. Résultats du maillage et présence des bosses et creux sur 3D RESHAPER.....	64
Figure 100. Paramètres de configuration d'un maillage sur 3D RESHAPER.....	64
Figure 101. Affichage du nuage de points sur 3D RESHAPER.....	65
Figure 102. Modèle 3D du puit frontal importé sur 3D RESHAPER.....	65
Figure 103. Superposition du nuage de points sur le modèle 3D dans 3D RESHAPER.....	66
Figure 104. Palette des couleurs sur 3DR.....	66
Figure 105. Paramètres de configuration de l'analyse comparative sur 3DR.....	66
Figure 106. Résultat d'analyse comparative 3DR.....	67
Figure 107. Nuage de points galerie de recul sur 3DR.....	67
Figure 108. Extraction automatique du profil théorique sur 3DR.....	68
Figure 109. Résultat de l'analyse des profils sur 3DR.....	68
Figure 110. Nuage de points de l'ouvrage IV.....	69
Figure 111. Nuage de point de l'ouvrage IV et polylignes dessinées à partir du nuage.....	70
Figure 112. Polylignes extraites à partir du nuage de point de l'ouvrage IV.....	70
Figure 113. Importation des polylignes sur AutoCAD.....	71
Figure 114. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans REVIT.....	73

Figure 115. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans BUILDIT.....	73
Figure 116. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans 3DR.....	74
Figure 117. Vue en plan des distances lierne-paroi moulée et distance d'analyse.....	74
Figure 118. Résultat d'analyse AS-BUILT avec 20cm de tolérance de calcul. ....	75
Figure 119. Résultat d'analyse AS-BUILT avec 15cm de tolérance de calcul. ....	75
Figure 120. Graphique du résultat d'analyse d'AS-BUILT.....	76
Figure 121. Résultat d'analyse de BUILDIT.....	77
Figure 122. Résultat d'analyse de 3DR.....	78
Figure 123. Résultat d'analyse des profils d'AMBERG TUNNEL.....	79
Figure 124. Résultat d'analyse des profils de 3DR.....	79
Figure 125. Etapes pour le post-traitement des nuages de points. ....	80
Figure 126. Cheminement polygonale secondaire. ....	82
Figure 127. Console double pour la polygonale secondaire.....	82

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Procédure campagne SCAN 3D

Annexe 2 : Tableau comparatif des logiciels

Annexe 3 : Comparaison levé topo vs SCAN 3D

Annexe 4 : Récolement analyse comparative de la galerie transversale

Annexe 5 : Procédure analyse SCAN 3D

Annexe 6 : Planning

Annexe 7 : Analyse des profils de la galerie de recul

Annexe 8 : Analyse comparative modèle 3D vs nuage de points du Radier du puit  
GOURAUD

## LISTE D'ABREVIATIONS ET ACRONYMES

<b>MOE</b>	Maître d'Œuvre
<b>MOA</b>	Maître d'Ouvrage
<b>DOE</b>	Dossier des Ouvrages Exécutés
<b>BYTP</b>	Bouygues Travaux Publics
<b>GPM</b>	Gare Porte Maillot
<b>PF</b>	Puit Frontal
<b>BIM</b>	Building Information Modeling
<b>AQ</b>	Assurance Qualité
<b>CQ</b>	Contrôle Qualité
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
<b>3DR</b>	3D Reshaper
<b>TP</b>	Travaux Publics
<b>RER</b>	Réseau Express Régional
<b>REN</b>	Regional Express Network
<b>FEW</b>	Folder of Executed Works
<b>SNCF</b>	Société Nationale des Chemins de Fer français

# 1. INTRODUCTION

Le présent document contient une étude sur l'exploitation des scans 3D menée dans le cadre d'un stage de fin d'étude au sein du service Topographie sur le chantier du prolongement du RER E vers l'Ouest, de HAUSSMANN ST-LAZARE à COURBEVOIE.

Ce chantier du prolongement du RER E fait partie du projet EOLE qui est réalisé par un Groupement d'entreprises (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, RAZEL-BEC, SEFI-INTRAFOR et EIFFAGE TP) dont l'entreprise mandataire et également celle d'accueil du stage est BOUYGUES-TP.

L'obtention du Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE) numérique était l'objet de discussion bien avant mon arrivé sur le chantier. De ce point a surgit la problématique, de mettre en place une procédure d'assemblage, analyse et modélisation des nuages de points obtenus, par le biais d'un scanner 3D, pour le DOE numérique tout en respectant le planning établi.

Mis à part cela, des interventions topographiques classiques seront également réalisées notamment des implantations et relevés afin de permettre l'exécution, le contrôle et l'avancement des travaux.

Afin d'atteindre les objectifs visés, le service Topographie avait mis à dispositions des moyens humains (Equipe du service Topographie et du service BIM), de moyens matériels (scanner laser FARO FOCUS S150, station totale LEICA TS16 et niveau LS15) et des moyens logiciels (AutoCAD, SCENE et AS-BUILT).

La problématique et les objectifs qui ont été mis en place m'ont poussé à opter pour ce stage car ils entraînaient des grandes attentes et donc un challenge à relever.

Ce rapport commencera par une présentation de l'organisme d'accueil, du projet et du service d'accueil du stage. Cette présentation sera suivie du développement et analyse du scan 3D sur le chantier ainsi qu'une comparaison des différentes solutions obtenues après les tests effectués sur les logiciels.

Pour clore cette étude, une conclusion générale sera faite sur le travail réalisé et quelques annexes seront jointes à la fin du document.

## INTRODUCTION (ANGLAIS)

This document contains a study on the use of 3D scans carried out as part of an end-of-study internship in the Survey Department on the site of the extension of the REN E to the West, from HAUSSMANN ST-LAZARE to COURBEVOIE.

This REN E extension project is part of the EOLE project, which is being carried out by a group of companies (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, RAZEL-BEC, SEFI-INTRAFOR and EIFFAGE TP) whose representative company and also the company hosting the internship is BOUYGUES-TP.

Obtaining the digital Folder of Executed Works (FEW) was the subject of discussion long before I arrived on site. From this point the problem arose, to set up a procedure for assembling, analyzing and modelling the point clouds obtained, by means of a 3D scanner, for digital FEW while respecting the established schedule.

In addition, traditional survey interventions will also be carried out, in particular settlements and surveys, in order to allow the execution, control and progress of the work.

In order to achieve the objectives set, the survey Department had made available human resources (Survey and BIM Department Team), material resources (FARO FOCUS S150 laser scanner, LEICA TS16 total station and LS15 level) and software resources (AutoCAD, SCENE and AS-BUILT).

The problems and objectives that were set up led me to opt for this internship because they raised high expectations and therefore a challenge to be met.

This report will begin with a presentation of the host organization, the project and the internship host service. This presentation will be followed by the development and analysis of the 3D scan on site and a comparison of the different solutions obtained after the tests performed on the software.

To conclude this study, a general conclusion will be made on the work done and some appendices will be attached at the end of the document.

## 2. OBJECTIFS

L'objectif principal de ce travail est centré sur l'obtention des DOE numérique. C'est un sujet assez sensible du fait que les travaux prennent de l'ampleur au fil du temps et que le récolement des ouvrages exécutés doit se faire plus rapidement afin d'être en mesure de bien suivre l'avancement des travaux.

De ce point est née la problématique, qui est l'objectif principal de ce TFE, de mettre en place une procédure d'assemblage, analyse et modélisation d'un nuage de points obtenu, par le biais d'un scanner 3D, pour le DOE numérique tout en respectant le planning de TFE établi.

Evidemment, l'obtention des DOE numérique se fait déjà en utilisant les instruments topographiques classiques (Station totale et niveau) mais seulement le chantier a décidé d'aller plus loin en exploitant au mieux les nuages de points obtenu par un scanner 3D pour une analyse comparative entre le théorique (modèle 3D) et le mesuré (nuage de points).

Cette analyse s'applique aux ouvrages existants autour de nos chantiers ainsi qu'aux ouvrages exécutés par le Groupement.

Après discussion sur la problématique, le chantier a décidé que la solution pour mettre en place une telle procédure est d'effectuer plusieurs tests sur des logiciels d'exploitation des nuages de points. Pour cela, une liste des logiciels a été préalablement établit sous certains critères (fonctions du logiciel, rendement, options d'essai du logiciel, etc.) afin d'éviter de perdre du temps sur ceux qui ne seraient pas utiles.

De ce pas, il était important qu'une personne, dans ce cas un stagiaire, soit complètement immergée dans le sujet pour notamment faire avancer les recherches dans le domaine d'exploitation des nuages de points orientée aux travaux publics.

En parallèle à l'objectif principal, des missions secondaires doivent également être effectuées, telles que l'approfondissement du travail classique du Topographe sur le chantier (levés et implantations) et la découverte de la topographie en tunnel (polygonale et guidage du tunnelier).

## 3. PRESENTATION ORGANISME D'ACCUEIL

### 3.1. BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS

BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS est une entreprise spécialisée dans les travaux souterrains, les projets de génie civil complexes, les grands ouvrages d'art, les infrastructures routières, ferroviaires, portuaires et de transports en commun. C'est une filiale de BOUYGUES-CONSTRUCTION, branche du groupe BOUYGUES.

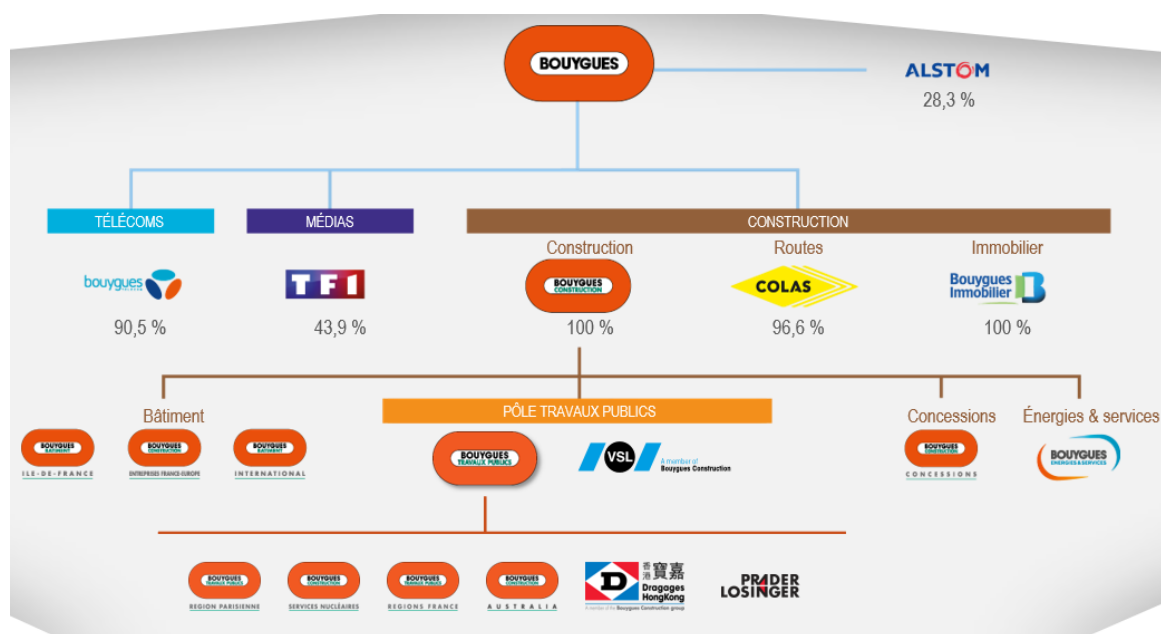


Figure 1. Arbre hiérarchique BYTP.

L'entreprise est présente dans de nombreux pays à travers le monde. Elle concentre son développement sur les opérations d'envergure qui lui permettent de mobiliser son expertise technique et ses compétences en matière de management de projets complexes associant très souvent un grand nombre d'entreprises groupées.



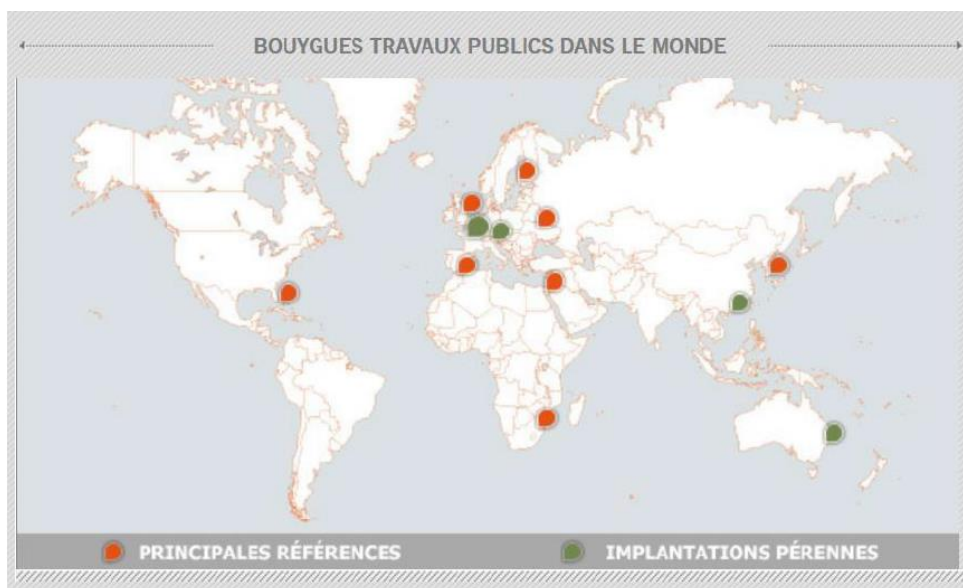


Figure 2. Répartition de BYTP à travers le monde.

Les valeurs de l'entreprise reposent sur une attention particulière et une personnalisation des parcours pour ses collaborateurs en assurant l'égalité des chances pour tous sans distinction d'origines ou de genres ; sur l'intégration du développement durable au sein de tous ses projets ; sur une volonté de relever des défis techniques au niveau mondial ; et enfin sur la santé et la sécurité de tous ses collaborateurs avec un objectif, assuré 0 accident sur tous ses chantiers.

Le comité de direction est composé de 9 membres dont Jean-Philippe TRIN, le président, Philippe AMEQUIN, le directeur général et Bertrand BURTSHELL, le directeur général adjoint s'occupant de la région parisienne et des grands travaux France.

### 3.2. LE PROJET EOLE

Le projet EOLE est reparti sur plusieurs sites dont certains se trouvent sur Paris et d'autres en Île-de-France. Le bureau du service dans lequel le stage s'est déroulé, service Topographie, se situe à COURBEVOIE face au 76 avenue Gambetta dans le département des Hauts-de-Seine.

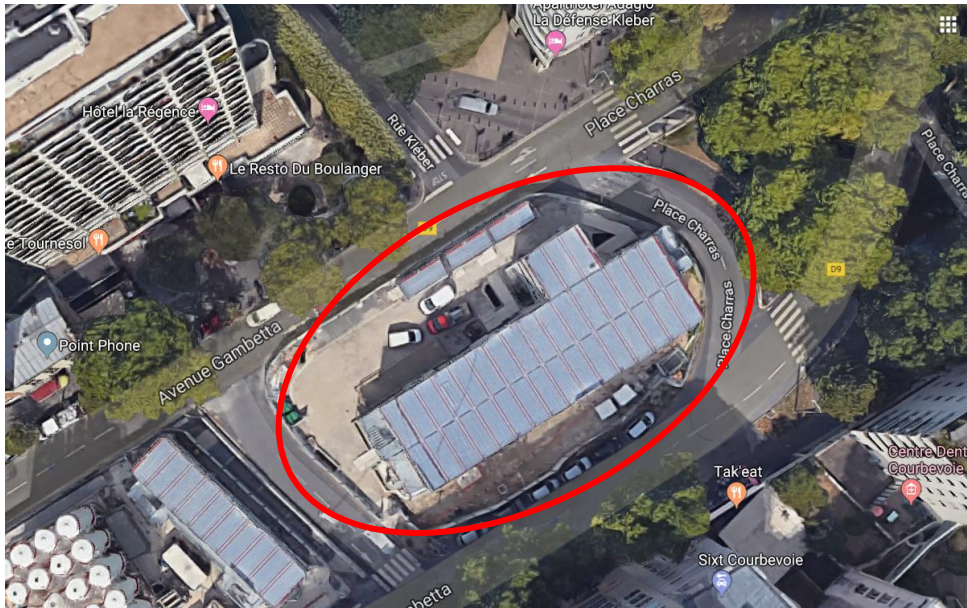


Figure 3. Emplacement bureaux chantier GAMBETTA.

Le projet EOLE, mis en place par la Société Nationale des Chemins de Fer français (SNCF en sigles), consiste à prolonger la ligne du RER E vers l'Ouest de l'Ile-de-France sur 55Km.

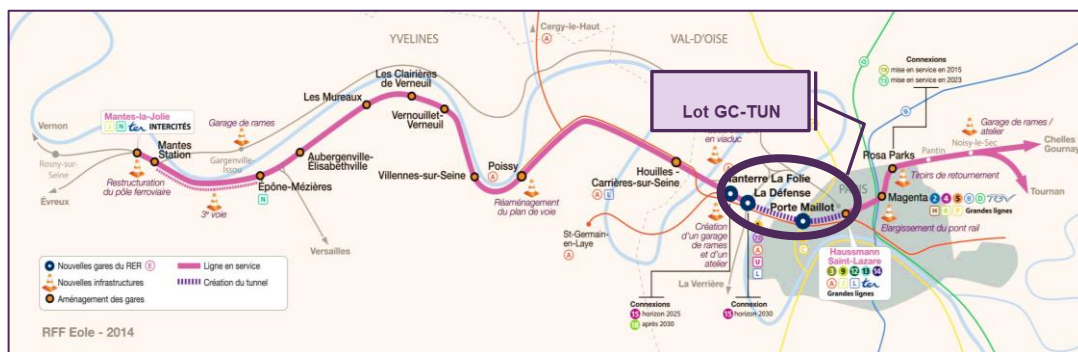


Figure 4. Vue en plan du projet EOLE.

Ce projet comprend des travaux des voies nouvelles, voies rénovées et aussi des gares créées et réaménagées. Cette nouvelle ligne E vise à réduire fortement les temps de parcours, assurer le développement de l'Ouest francilien et renforcer les dessertes.

Les 55Km de tracés à réaliser sont pris en charge par plusieurs Groupements d'entreprises et le tronçon EOLE GC-TUN sur lequel le stage s'est déroulé va de HAUSSMANN ST-LAZARE à COURBEVOIE. Ce tronçon s'étend sur une longueur de 6,1Km.



Figure 5. Vue en plan lot GC-TUN.



### 3.2.1. MAITRE D'OUVRAGE

Comme mentionné plus haut, ce projet a été initié par la SNCF qui est dans ce cas le maître d'ouvrage. Le projet EOLE est inclut dans le projet de la SNCF qui consiste à créer un réseau de haute performance pour faire circuler plus de trains, plus souvent et en toute sécurité.



Figure 6. Société Nationale des Chemins de Fer français.

---

### 3.2.2. MAITRE D'ŒUVRE

La maîtrise d'œuvre choisit pour la conduite opérationnelle des travaux en matière de coûts, de délais et de choix techniques est un Groupement représenté par les entreprises SETEC, EGIS et DUTHILLEUL.



Figure 7. Maîtrise d'Œuvre du lot GC-TUN.

---

### 3.2.3. PRINCIPAUX ACTEURS ET CHIFFRES CLES

Les travaux sont réalisés par un Groupement représenté par les entreprises BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS, EIFFAGE, RAZEL-BEC et SEFI-INTRAFOR avec un coût total qui va aux alentours de 460 M€ estimés pour une durée de 60 mois.

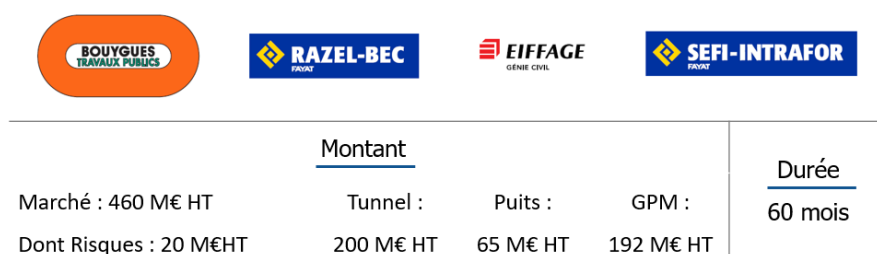


Figure 8. Groupement d'entreprises.

L'organisation mise en place par le groupement sur le projet se déclinera selon un organigramme similaire à celui présenté ci-dessous.



Figure 9. Organigramme des principaux acteurs du projet.

Ce Groupement dont BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS est l'entreprise mandataire et également celle d'accueil du stage, s'occupe du creusement de 6.1Km de tunnel au tunnelier, des ouvrages annexes (Puit Gambetta, Puit Abreuvoir, Puit Gouraud et 5 rameaux), d'une station de traitement des boues, des conduites d'évacuation des déblais et d'une gare de 225m de long (Gare Porte Maillot).

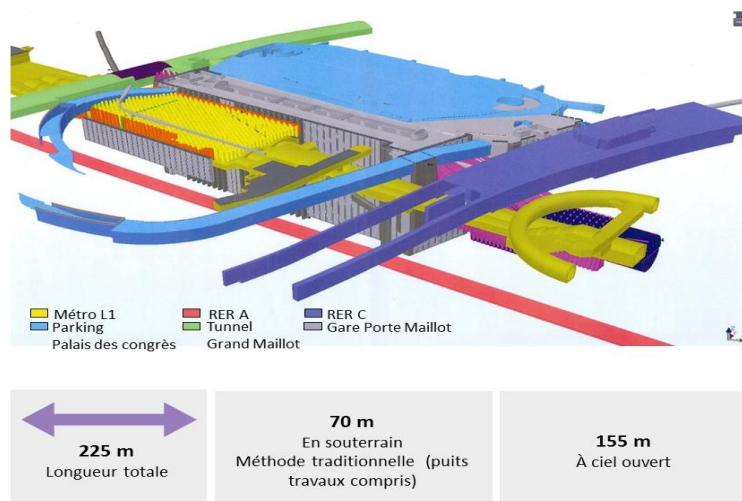


Figure 10. GPM : vue sur les transports existants.

Les ouvrages annexes se font de manière traditionnelle et le puit de départ du tunnelier est le puit *Gambetta*.

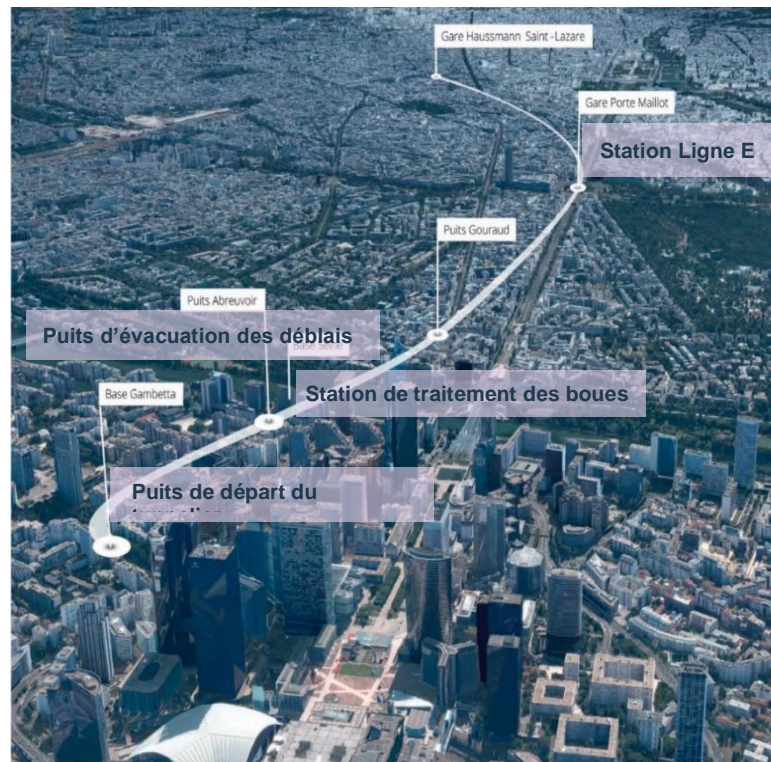


Figure 11. Vue sur les différents ouvrages et trace du tunnelier.

L'un des principaux enjeux du chantier GC-TUN est de limiter l'impact sur l'environnement en surface. Pour y répondre, le Groupement a conçu une solution logistique globale qui limite le trafic urbain et les nuisances sonores liées à l'activité du chantier : **une conduite de marinage** à travers Courbevoie.

Cette conduite permettra d'évacuer les déblais du tunnelier jusqu'à la station de traitement des boues située en bord de Seine. La totalité des déblais du tunnelier, 2000 m<sup>3</sup> par jour, seront évacués par voie fluviale.

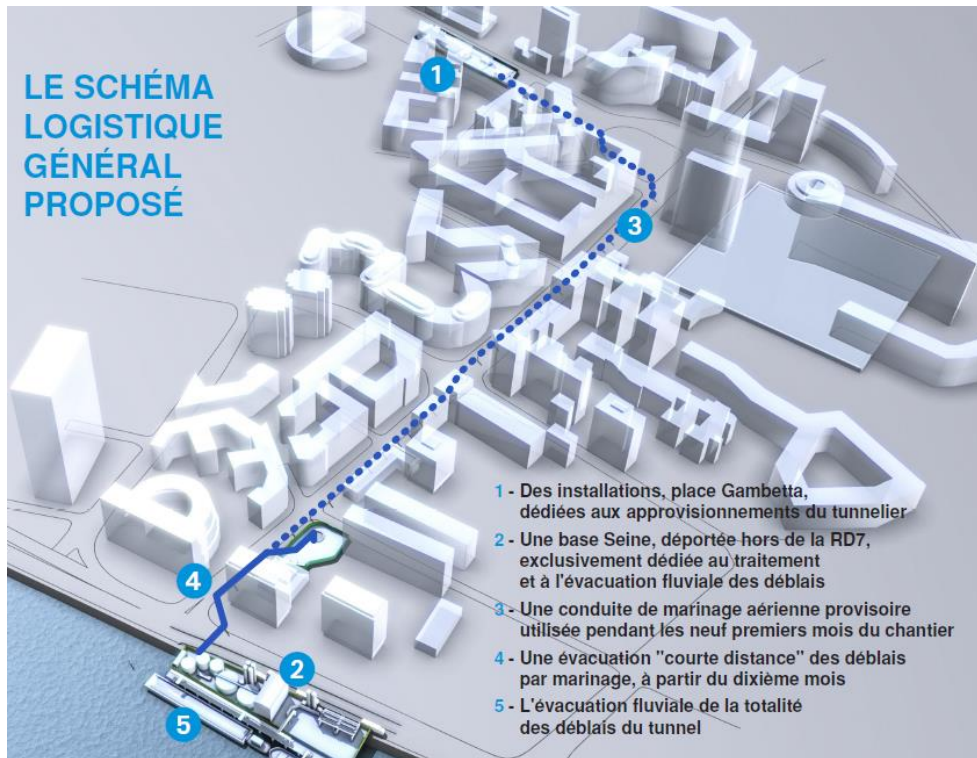
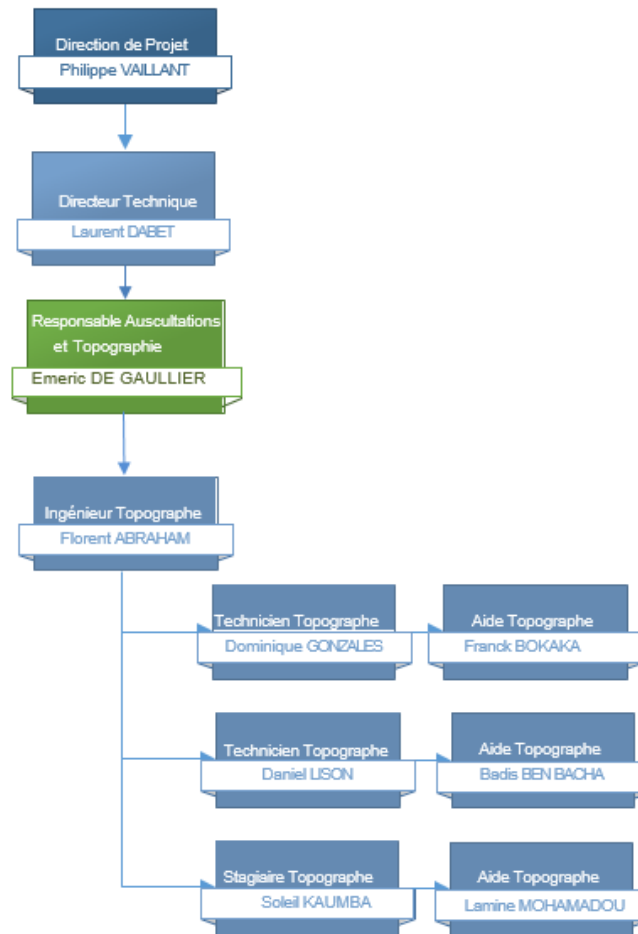


Figure 12. Cheminement de la conduite de marinage.

### 3.3. LE SERVICE TOPOGRAPHIE

#### 3.3.1. MOYEN HUMAIN

Le stage s'est effectué au sein du service Topographie. Ce service est composé de deux Ingénieurs Topographes dont l'un était mon tuteur, deux techniciens topographes et trois aides Topographe.



**Figure 13. Organigramme du service Topographie.**

Pour toute demande d'intervention Topographique le demandeur se doit de remplir le document appelé DTT (Demande de Travaux Topographiques) qui est fourni par le service en y détaillant les tâches à réaliser, le plan de référence, la date d'intervention et surtout spécifiant la précision nécessaire pour l'intervention.

Cette méthode de travail permet au service Topographie de mieux s'organiser et former les groupes d'intervenants sur le terrain. Le nombre d'intervenants par groupe varie en fonction du niveau de difficulté de l'opération, les grosses opérations demandent plus de personnel que les petites opérations.



### 3.3.2. MOYEN MATERIEL

Au niveau matériel, le service Topographie est très bien équipé. Il a en sa possession une variété d'instruments nécessaires pour satisfaire les demandes de travaux topographiques.

Les interventions topographiques classiques et les campagnes de scan 3D sur le chantier se réalisent à l'aide des instruments ci-dessous

#### STATIONS TOTALE LEICA TS60, TS16 ET STATION TOTALE TOPCON GT

Pour mener à bien les interventions topographiques classiques, le service Topographie possède une station totale TS60 et deux stations totale TS16 de la maison Leica dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous



Figure 14. Leica TS60



Figure 15. Leica TS16

#### MESURE ANGULAIRE

Précision <sup>1</sup> Hz et V	Absolue, continue, quadruple	0,5" (0,15 mgr)
--------------------------------	------------------------------	-----------------

#### MESURE DE DISTANCE

Portée <sup>2</sup>	Avec prisme (GPR1, GPH1P) <sup>3</sup> Sans prisme / Toute surface <sup>4</sup>	1,5 m à >3500m 1,5 m à >1000m
Précision > Durée de la mesure	Simple (prisme) <sup>2,5</sup> Simple (toute surface) <sup>2,4,5,6</sup>	0,6 mm + 1ppm / habituellement 2,4 s 2 mm + 2 ppm / habituellement 3 s
Taille du point laser	À 50 m	8mm x 20mm
Technologie de mesure	Analyseur du système	Coaxial, laser rouge visible

Figure 16. Fiche technique Leica TS60.

#### MESURE D'ANGLE

Précision <sup>1</sup> Hz et V	Absolue, continue, diamétrale	1" (0,3 mgr), 2" (0,6 mgr), 3" (1 mgr), 5" 1,5 mgr)
--------------------------------	-------------------------------	--

#### MESURE DE DISTANCE

Portée <sup>2</sup>	Avec prisme (GPR1, GPH1P) <sup>3</sup> Sans prisme / Toute surface <sup>4</sup>	1,5 m à >3500m R500 : 1,5 m à > 500m R1000 : 1,5 m à >1000m
Précision > Durée de la mesure	Simple (prisme) <sup>2,5</sup> Simple (toute surface) <sup>2,4,5,6</sup>	1 mm + 1,5 ppm / habituellement 2,4 s 2 mm + 2 ppm / habituellement 3 s
Taille du point laser	À 50 m	8mm x 20mm
Technologie de mesure	Analyseur du système	Coaxial, laser rouge visible

Figure 17. Fiche technique Leica TS16.

En ce qui concerne le guidage du tunnelier, le service Topographie dispose de deux stations totales Topcon GT. Le guidage du tunnelier se fait à l'aide du logiciel PYXIS développé par Bouygues Travaux Publics.



Figure 19. Station totale Topcon GT.

Angle Measurement	
GT-502: 2"	GT-1001: 1"
GT-503: 3"	GT-1002: 2"
GT-505: 5"	GT-1003: 3"
Tilt Angle Compensation	
Compensation	Liquid 2-axis tilt sensor
Range	±6'
Distance Measurement	
Prism EDM Range	
GT-500	4,500 m
GT-1000	5,000 m
Prism EDM Accuracy	
GT-500	2 mm + 2 ppm
GT-1000	1 mm + 2 ppm
Non-Prism Range	
GT-500	800 m
GT-1000	1,000 m
Non-Prism Accuracy	
2 mm + 2 ppm (0.3 - 200 m)	
Measuring Time	
Fine: 0.9 sec	
Rapid: 0.6 sec	
Tracking: 0.4 sec	

Figure 18. Fiche technique Topcon GT.

### LASER SCANNER FARO FOCUS S150

Laser scanner du Groupe FARO, c'est l'instrument choisi pour réaliser les scans 3D sur les différents sites du projet. Il a une vitesse d'acquisition des données de 976 000 pts/sec avec une précision de 2mm à 10m et 11mm à 100m.






Figure 20. Faro FOCUS S150.

Vitesse de mesure (pts/s) :	122 000 / 244 000 / 488 000 / 976 000
Erreur de mesure <sup>4</sup>	±1 mm
Précision angulaire <sup>5</sup> :	19 secondes d'arc pour angles verticaux/horizontaux
Précision de position 3D <sup>6</sup> :	10 m : 2 mm / 25 m : 3,5 mm
<b>Unité couleur</b>	
Résolution :	Couleur jusqu'à 165 mégapixels
High Dynamic Range (HDR) :	Bracketing d'exposition 2x, 3x, 5x
Parallaxe :	Minimisée par la conception co-axiale

Figure 21. Fiche technique FOCUS S150.

## NIVEAU LEICA LS15

Pour toute opération de nivellement, le service possède deux Niveau LS15 de la maison Leica dont les caractéristiques apparaissent ci-dessous



	Leica LS10	Leica LS15
<b>MESURE DE HAUTEUR</b>		
Précision <sup>1</sup> à l'aide d'une mire Invar standard	0,3 mm	0,2 mm, 0,3 mm
Précision <sup>2</sup> à l'aide d'une mire standard	1,0 mm	1,0 mm
<b>MESURE DE DISTANCE</b>		
Précision <sup>3</sup>	15 mm à 30 m	15 mm à 30 m
<b>PLAGE DE MESURE</b>		
Portée minimale	1,8 m	1,8 m
Portée maximale <sup>4</sup>	110 m	110 m
Durée de mesure	Habituellement 2,5 s	Habituellement 2,5 s
<b>AUTOFOCUS</b>		
Plage de travail	X	De 1,8 m à l'infini
Durée de mise au point	X	Habituellement 4 s

Figure 23. Leica LS15

Figure 22. Fiche technique Leica LS15.

### 3.3.3. MOYEN LOGICIEL

Au niveau des logiciels, le service Topographie a en sa disposition une variété de logiciels qui couvrent ses besoins administratifs et techniques. Ces logiciels disponibles sont les suivants :

- **Microsoft Office et Adobe Acrobat** : Pour tout ce qui touche à l'administration, documentation et rapports.
- **AutoCAD\Covadis** : Pour la préparation et les traitements des interventions topographiques.
- **Scene et As-built de FARO** : Pour le traitement et l'exploitation des nuages de points issus du scanner 3D Focus S150.
- **Amberg Tunnel** : Pour les interventions topographiques nécessitant un axe comme référence. Cas de figure des implantations dans un tunnel.

## 4. DEVELOPPEMENT ET ANALYSE DU SCAN 3D SUR EOLE

### 4.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

---

#### 4.1.1. PROBLEMATIQUE

La problématique autour de laquelle les études seront menées est d'arriver à mettre en place une procédure pour l'exploitation des nuages de points obtenus par un scanner 3D.

---

#### 4.1.2. OBJECTIFS

La mise en place de cette procédure a générée les objectifs suivants :

- ❖ Effectuer des tests sur différents logiciels d'exploitation du nuage de points.
- ❖ Rechercher et tester sur ses logiciels des fonctionnalités d'assemblage, analyse et modélisation des nuages de points.
- ❖ Dresser une liste des points forts et faible après emploi de chaque logiciel.

La partie analyse repose sur trois axes principalement :

---

##### 4.1.2.1. ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LE THEORIQUE (MODELE 3D) ET LE MESURE (NUAGE DE POINTS)

Le but de cette étude est d'obtenir un rapport d'analyse montrant les écarts de distance entre les surfaces du modèle 3D et le nuage de points. Ces écarts de distance permettent de vérifier la tolérance d'exécution de l'ouvrage.

---

##### 4.1.2.2. ANALYSE COMPARATIVE ENTRE DEUX NUAGES DE POINTS DU MEME OBJET SCANNE

L'objectif de cet exercice est de détecter tout type de déplacement que peut subir l'ouvrage pendant sa construction. Ce cas de figure peut être appliqué lorsqu'on n'est pas en

possession d'un modèle théorique et que l'on veut contrôler la position d'un ouvrage pendant une certaine durée.

---

#### 4.1.2.3. ANALYSE DES PROFILS

Cette analyse a pour but de comparer un profil théorique (modèle 3D) à un profil obtenu grâce au nuage de points. Ce cas pratique est plus orienté au tunnel, il permet d'obtenir les zones dites hors ou sous profil.

Les nuages de points peuvent aussi être utilisés pour des relevés topographiques quasi-exhaustifs, en effet le scanner récupère toute information visible depuis son point de lancement et cela permet d'avoir plus d'information en sa possession contrairement à un levé topographique classique à la station totale.

## 4.2. DEFINITION DU PLAN D'ACTION

---

### 4.2.1. LOGICIELS IDENTIFIES

Pour éviter de perdre du temps à tester des logiciels qui nous seraient pas utiles, nous avons décidé d'échanger avec des commerciaux, clients et Topographes d'autres chantiers afin d'établir une liste des logiciels à tester.

Les logiciels sélectionnés sont répartis selon deux catégories : **logiciels de traitement des nuages de points et logiciels d'exploitation des nuages de points.**



Figure 25. Faro SCENE.

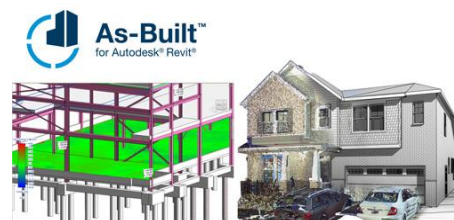


Figure 24. Faro AS-BUILT.

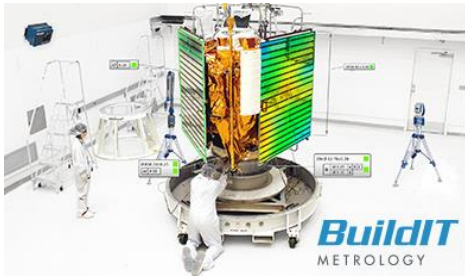


Figure 26. Faro AS-BUILT.



Figure 27. AMBERG TUNNEL.



Figure 30. 3D RESHAPER.



Figure 29. POLYWORKS.



Figure 28. TRIMBLE REALWORKS.

Chacun de ces logiciels a été utilisé pendant une durée de temps déterminée. Comme mentionné plus haut dans les objectifs, plusieurs tests sur différents logiciels devaient être réalisés et cela permettrait de découvrir les fonctionnalités des logiciels et aussi de savoir s'ils répondent aux attentes du chantier.

---

#### 4.2.2. PLANNING

Une fois la liste des logiciels établit, il est important maintenant de caser les périodes d'essai des logiciels selon des dates pour maintenir un bon un rythme de travail et assurer des bons résultats.

Cela dit, un planning a été dressé avec les différentes tâches à effectuer et les jours dédiés à ses tâches.

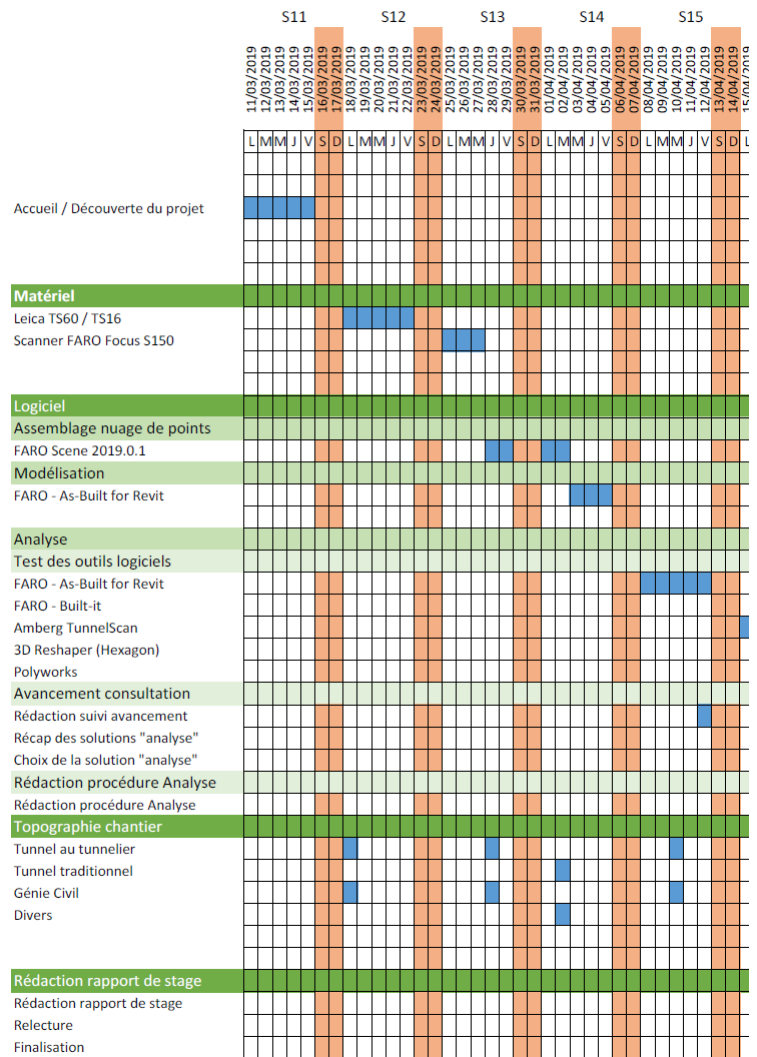


Figure 31. Planning de travail.

Le planning complet est joint en annexe du document.

### 4.3. SCAN 3D : EXPLOITATION DES NUAGES DE POINTS

Cette partie regroupe toutes les études sur les solutions d'analyse ainsi que les recherches sur l'exploitation des nuages de points.

---

#### 4.3.1. METHODE DE NUMERISATION 3D SUR EOLE

Le travail sur terrain se fait en absolu c'est-à-dire nous partons toujours des points de notre polygonale pour la mise en station et détermination des points correspondant aux sphères d'assemblage.

Le schéma ci-dessous décrit la procédure appliquée par le service Topographie.

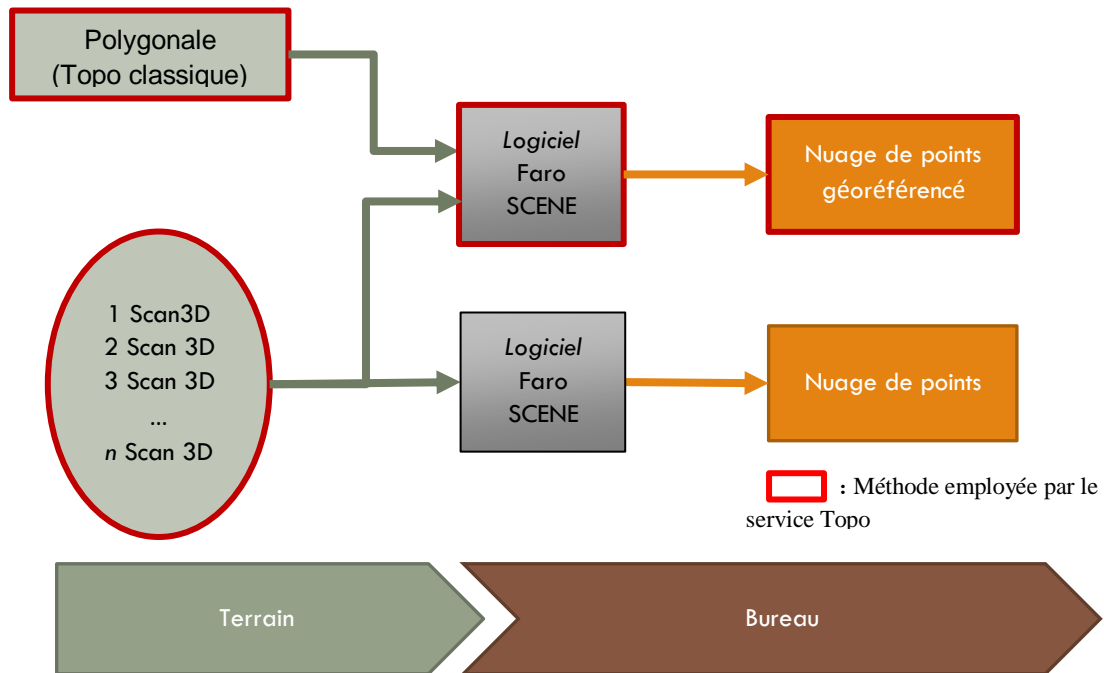


Figure 32. Procédure de géoréférencement scan sur EOLE.

---

##### 4.3.1.1. TERRAIN

Sur le chantier EOLE, les campagnes de scan se réalisent à l'aide des sphères d'assemblage et des prismes boules (*voir annexe I*). Une position de scan sur terrain a une durée qui varie de 2 min à 2 heures selon les paramètres définis dans le scanner.





Figure 34. Sphère d'assemblage.

- Diamètre : 145 mm
- Poids : 250 gr

Figure 36. Caractéristiques sphère d'assemblage.



Figure 33. Prisme boule.

- diamètre 30mm (sphère) et 17,5mm (prisme)
- Précision : +/- 0.05 mm
- Constante -11,3mm, (Leica : +23.1 mm)
- Portée 500 mètres max
- Poids : 80 gr

Figure 35. Caractéristiques prisme boule.

Les objets ci-haut sont utilisés pour l'assemblage et le géoréférencement des scans.

La particularité des sphères d'assemblage est qu'elles ont le même déport que les prismes boules, c'est-à-dire, le centre de la sphère est le même que celui du prisme boule. Cela permet de ne pas avoir à recalculer la position exacte de la sphère en post-traitement.

Sur terrain, des plaques métalliques sont installées et restent à demeure sur le chantier pour le géoréférencement. Ces plaques sont également utilisées pour poser les sphères et les prismes boules. Les positions des sphères sont obtenues à l'aide d'une station totale qui mesure les prismes boule.



Figure 37. Plaque métallique.

---

#### 4.3.1.2. POST-TRAITEMENT : FARO SCENE

SCENE est un logiciel complet de visualisation, gestion, administration, géoréférencement et traitement des données de numérisation complète obtenues par le biais de scanners 3D haute résolution tels que le FARO Focus.

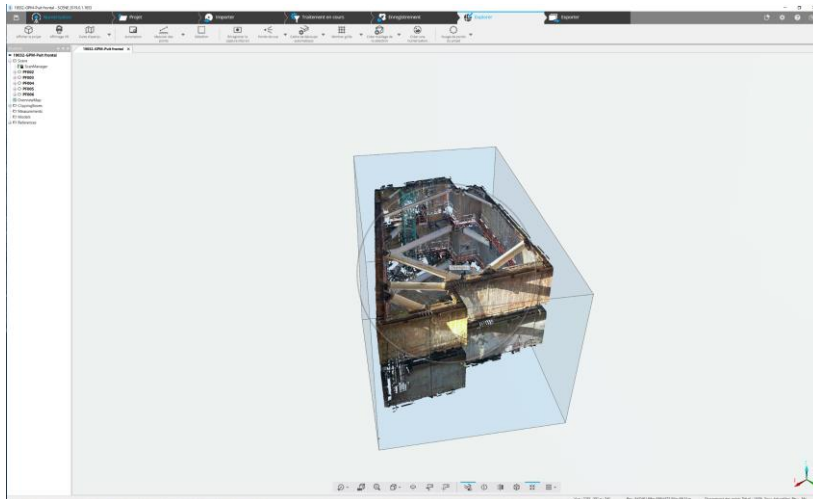


Figure 38. Espace de travail SCENE.

Le chantier a opté pour l'utilisation de ce logiciel parce qu'il est développé par le fabricant du laser scanner employé. C'est un choix judicieux car le fait d'utiliser le logiciel de traitement de scans bruts développé par le fabricant évite de perdre de l'information en exportant le nuage de points d'un format à un autre.

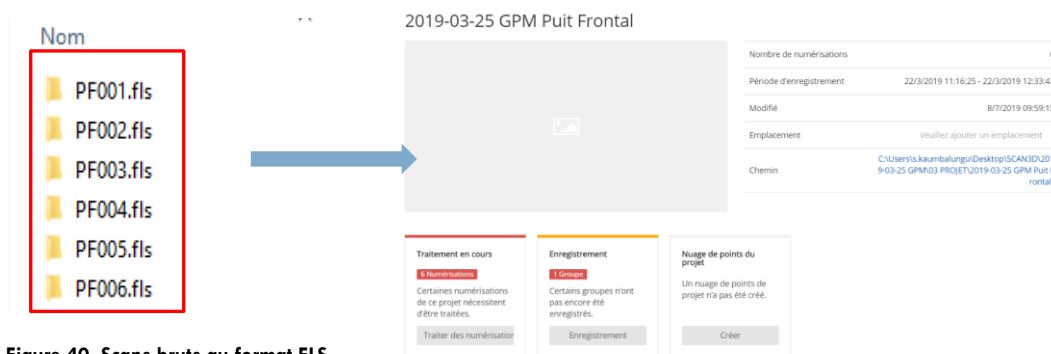
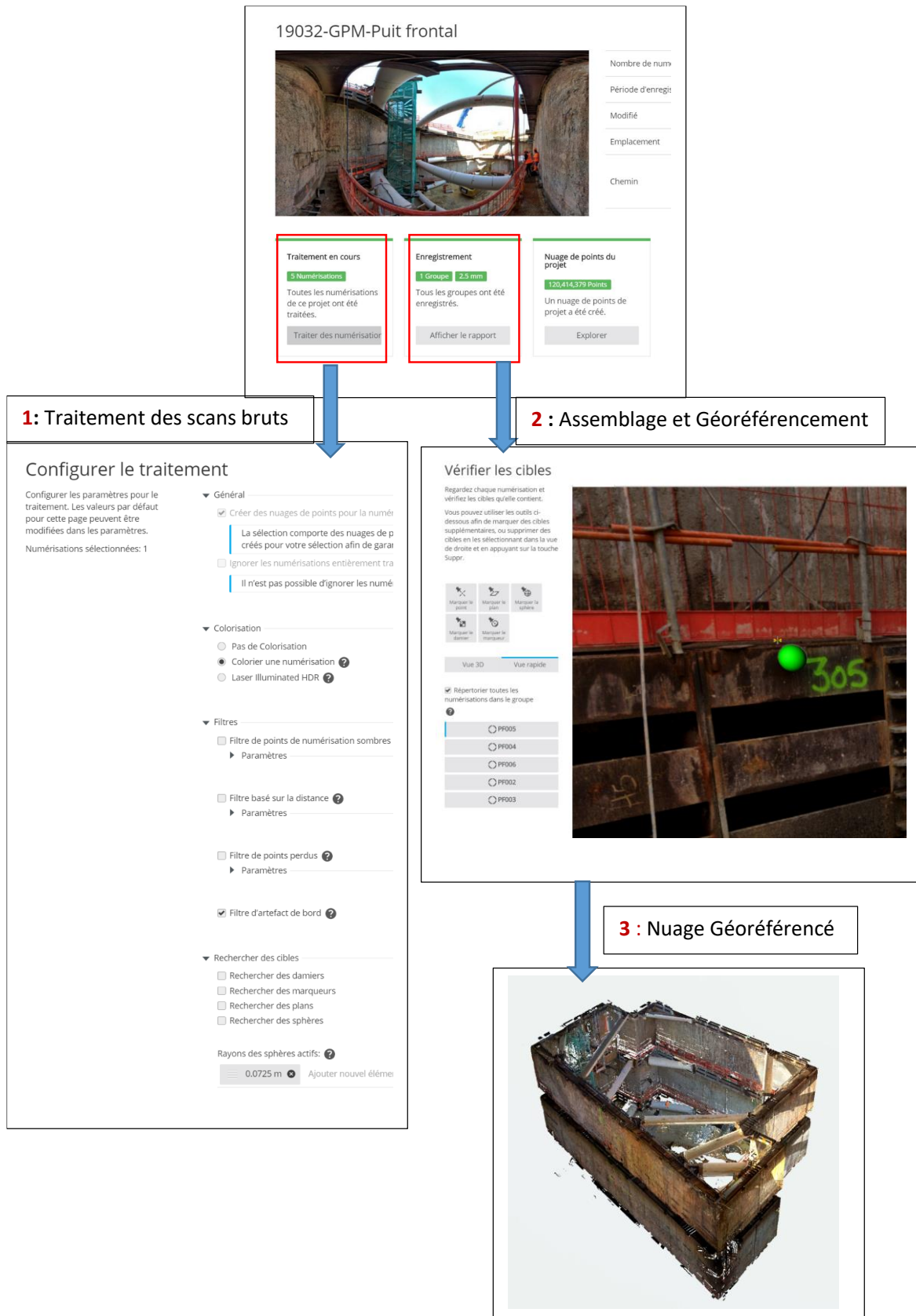


Figure 40. Scans bruts au format FLS.

Figure 39. Interface import données SCENE.

Ce logiciel est employé pour le traitement des scans bruts directement récupérés du scanner 3D, pour leur assemblage ainsi que leur géoréférencement au système de référence appliqué sur le chantier (*RGF93 : Lambert93*). Le temps de traitement varie habituellement entre 30min et 4 heures en fonction des paramètres renseignés pour le traitement.

Voici un schéma illustratif du processus de traitement des scans bruts suivi de l'assemblage et le géoréférencement.



**Figure 41. Procédure de traitement et géoréférencement des scans sur SCENE.**

Les nuages de points résultants de SCENE sont ensuite exportés sous différents formats pour être exploités sur d'autres logiciels.

SCENE offre également la possibilité d'effectuer une analyse sur le nuage de point de façon à connaître les zones creuses ou bossues mais seulement son analyse n'est pas correcte du fait qu'il faut créer un plan à partir du nuage de point pour calculer ensuite la distance des points par rapport à ce plan.

Afin d'améliorer ses performances, SCENE prend en compte de nombreux add-on tels que

- **ATS QUALITY MANAGER**

Cet add-on permet de vérifier et ajuster les statistiques d'assemblage et géoréférencement.

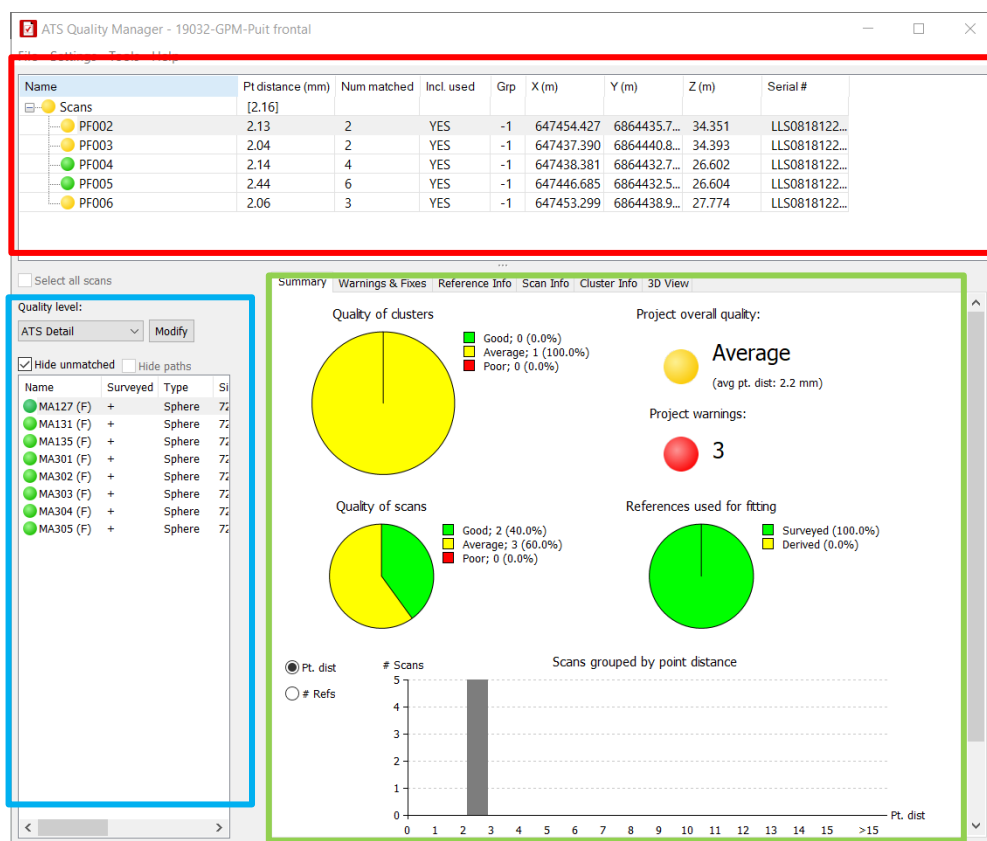


Figure 42. Interface ATS QUALITY MANAGER.

Son interface se compose de trois espaces :

- En rouge, un espace contenant la liste des scans et leurs informations pertinentes (distances max entre points, coordonnées de la position de scan et le nombre de sphères détectées).
- En bleu, un espace contenant la liste des points de référence (points géoréférencés).
- En vert, c'est la zone d'informations comportant cinq onglets différents, chacun d'entre eux fournissant des informations détaillées sur la qualité du projet.

Entre la liste des scans et la liste des références, se trouve le contrôle du niveau de qualité qui détermine les seuils de qualité à utiliser pour ce projet.

Dans le cas de cette campagne de scan, nous avons un total de cinq positions de scan (PF001, PF002, PF003, PF004 et PF005). Le progiciel a permis de détecter les positions de scan qui influencent le plus à la baisse de qualité d'assemblage. Ces positions apparaissent sur la liste des scans (cadre rouge) et la couleur affichée correspond à leur niveau de qualité.



**Figure 43. Code couleur-qualité ATS QUALITY MANAGER.**

La position PF001 n'apparaît pas sur la liste des scans illustrée précédemment dû à son niveau très pauvre de qualité (Poor). Après des nombreux essais d'ajustements de ses points de références, elle a finalement été éliminée de la campagne de scan et cela à améliorer la qualité globale d'assemblage.

Les positions offrant les meilleures qualités d'assemblage sont PF004 et PF005 car les angles entre les points de référence détectés et les scans sont grandement ouverts et cela assure un bon positionnement.

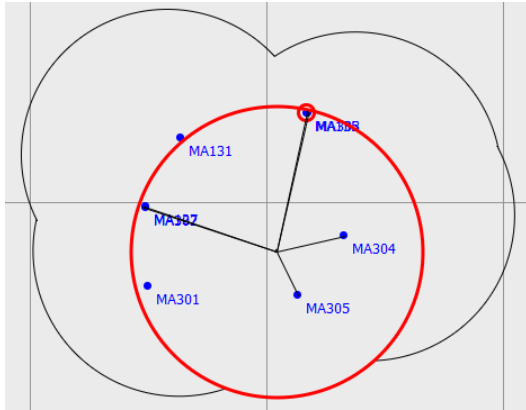


Figure 45. Angles entre points de référence et position PF005.



Figure 44. Vue 3D des scans et points de referenes.

### - ORTHOGRAPHIC PHOTO GENERATOR

Orthographic est un composant additionnel utile conçu pour SCENE qui permet à l'utilisateur de créer des images composées de points de numérisation sélectionnés à partir d'un point de vue orthographique.

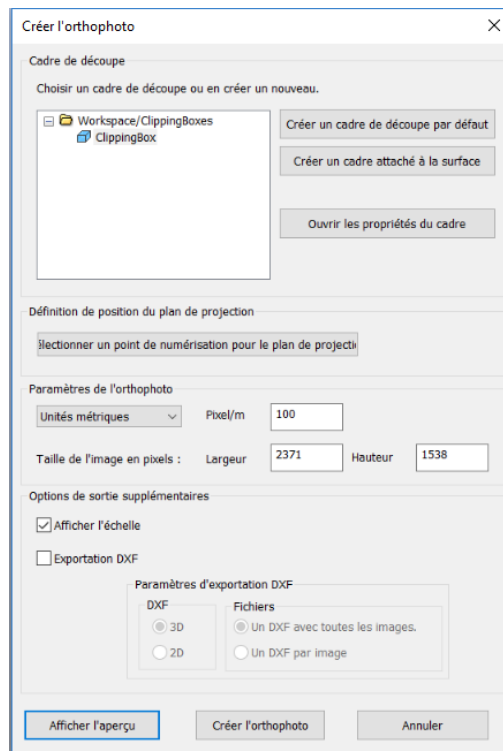


Figure 46. Interface Orthographic.

C'est un progiciel assez simple d'utilisation et fonctionne avec le cadre de découpe de SCENE.

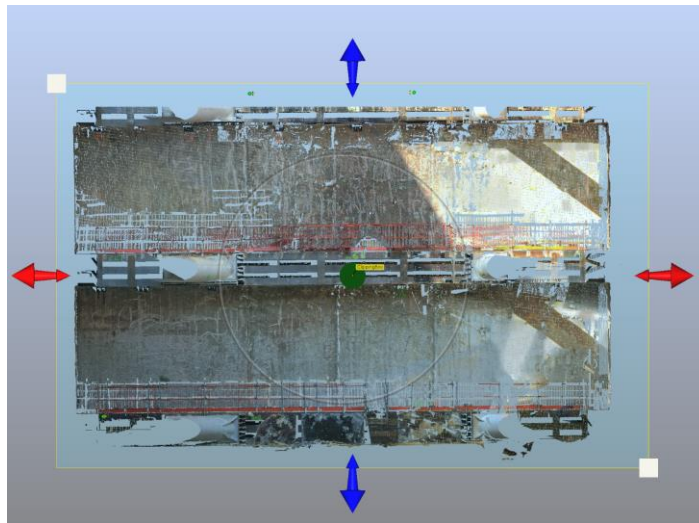


Figure 47. Délimitation zone pour l'orthophoto.

Ses fonctionnalités ont été utiles pour obtenir des rendus en orthophoto.

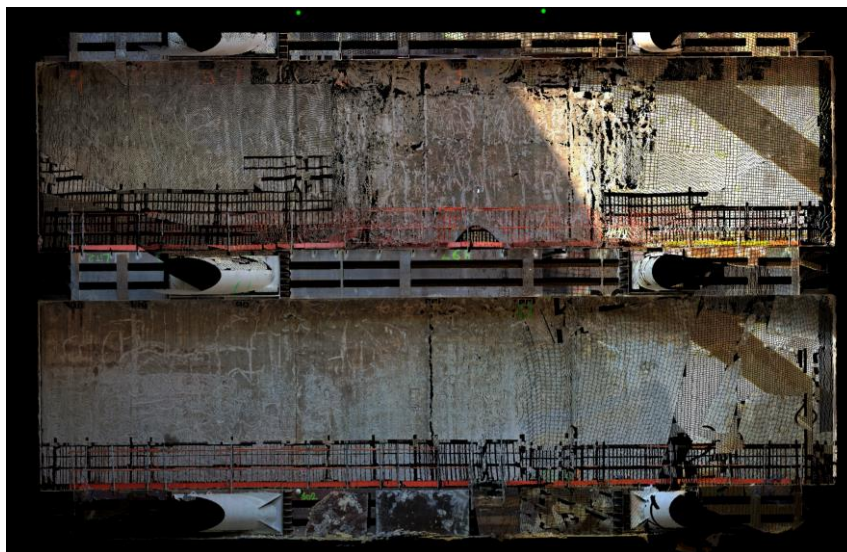


Figure 48. Orthophoto Puit Frontal.

#### - SENDTOREVIT

SendToRevit est un progiciel intégré sur SCENE qui permet de modéliser des objets à partir du nuage de points.



Figure 49. Interface SendToRevit.

Le progiciel offre des outils qui permettent d'interagir avec le nuage de point et reproduire l'objet dessiner sur Revit. Dans ce cas, l'objet qui a été modélisé est un voile du parking Palais de Congrès à Porte Maillot.



Figure 50. Vue sur voile du parking palais des congrès à porte maillot.

Le résultat de la modélisation apparaît instantanément sur Revit

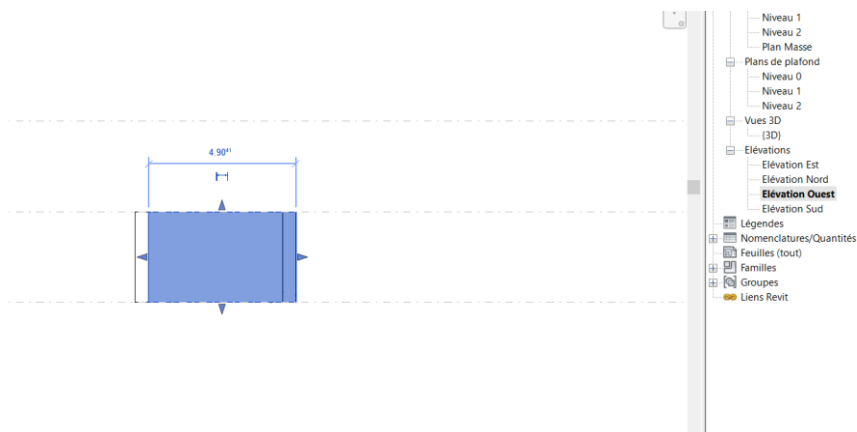


Figure 51. Voile modélisé à partir du nuage de point.

Mis à part ces différents exercices réalisés sur SCENE de FARO, j'ai décidé d'approfondir mes recherches et entreprendre un autre sujet qui est orienté sur la vérification de la précision d'acquisition des données avec le scanner Focus S150 (voir annexe 3).

Les missions proposées pour cette recherche sont de réaliser une campagne de scan, puis mesurer des points spécifiques (angles des poutres du plafond au niveau N-6 du parking Palais des Congrès) à l'aide d'une station totale et ensuite sur SCENE faire des mesures de distances entre ces angles sur le nuage de points et les comparer aux distances obtenues par calcul des coordonnées.



Ci-dessous sera présentée une liste des points forts et faibles du logiciel SCENE de FARO afin de clore les tests sur ses fonctionnalités.

### AVANTAGES

- Le logiciel est très bon pour l'assemblage et le géoréférencement des scans grâce à ses outils de détection automatique et manuel des damiers et/ou sphères.
- Le nuage de point traité peut aussi être utilisé comme modèle de présentation pour la réalité virtuelle en connectant les dispositifs VR au logiciel.
- SCENE crée un rapport statistique d'assemblage et géoréférencement. Cela permet d'améliorer la qualité et réduire les erreurs de son nuage de points résultant.

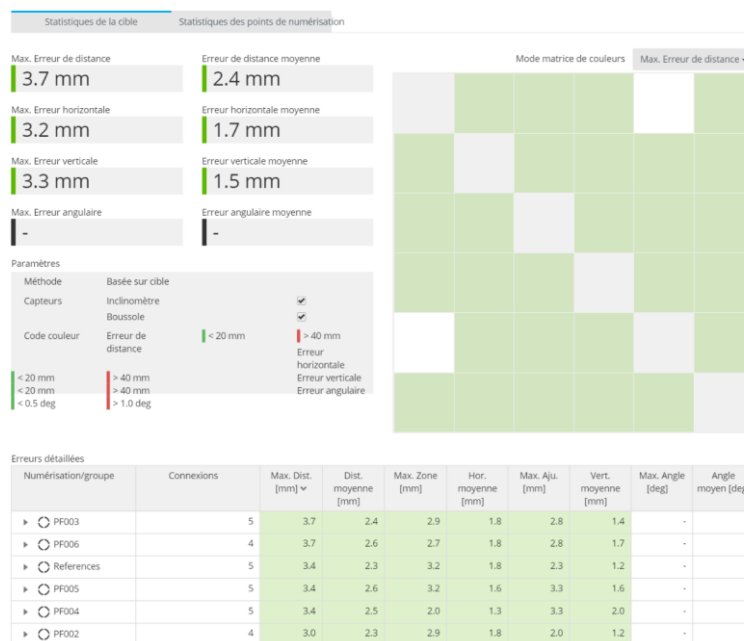


Figure 52. Rapport statistiques des cibles sur SCENE.

### INCONVENIENTS

- SCENE ne permet pas d'effectuer des pas en arrière immédiatement après une faute de manipulation. Il permet que des retours sur chaque sauvegarde du projet qu'il nomme *révision*.
- Le traitement simultané de plusieurs scans bruts peut parfois être très long voire même ne pas fonctionner (nombre important de scans et/ou scan trop volumineux). Ce problème est résolu en traitant les scans un par un, ce qui implique une augmentation du temps de traitement.

### 4.3.2. FARO AS-BUILT

AS-BUILT pour REVIT est une extension de logiciel (Add-on) développée par FARO qui s'intègre à l'interface utilisateur de Revit. Elle permet de traiter les données 3D numérisées dans Revit à l'aide des objets Revit et des maquettes BIM.

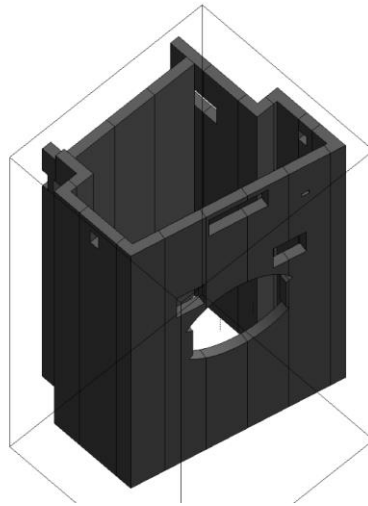


Figure 53. Espace de travail Faro AS-BUILT.

AS-BUILT comporte de nombreux outils d'analyse des données 3D numérisées ainsi que des commandes personnalisées pour la modélisation et représentation détaillée des éléments BIM.



Figure 55. Outils de modélisation As-built.

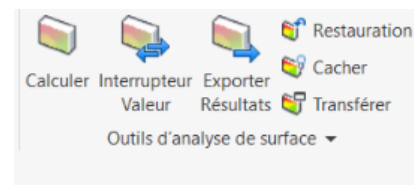


Figure 54. Outil d'analyse de surface AS-BUILT.

#### 4.3.2.1. MODELISATION

Dans cette section nous modéliserons des objets à partir du nuage de points. Les objets modélisables que propose AS-BUILT sont des murs, tubes, raccords de tuyau et des structures. N'ayant pas plus d'éléments dans sa bibliothèque, nos possibilités de modélisation sont réduites.

L'ouvrage qui fera sujet de modélisation est le parking du palais des congrès à porte maillot et les objets modélisés sont les piliers et les voiles intérieurs de chaque niveau du parking.

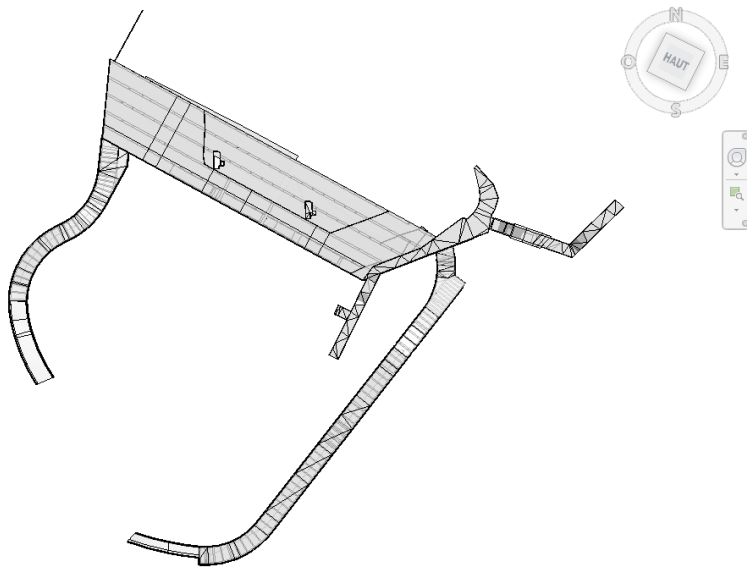


Figure 56. Vue en plan du modèle 3D du parking palais des congrès à porte maillot

Pour arriver à modéliser les voiles, le progiciel AS-BUILT propose de mettre des contraintes sur les niveaux (supérieur et inférieur) afin d'avoir la hauteur correcte du voile et ensuite en cliquant sur le nuage de points sur une vue en plan, le calcul d'ajustement du mur se fait et le mur se crée.

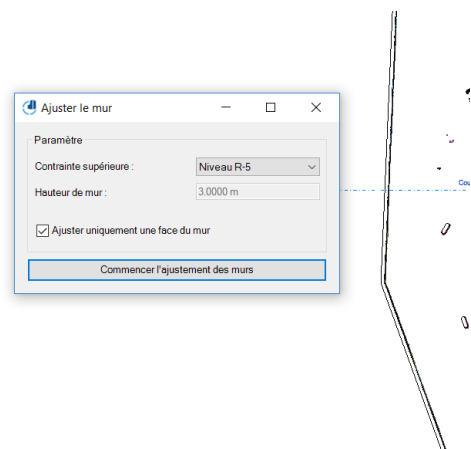


Figure 57. Paramètres ajustement des murs AS-BUILT.

Un résultat d'ajustement apparaît ensuite pour analyser la précision à laquelle le mur se détecte.

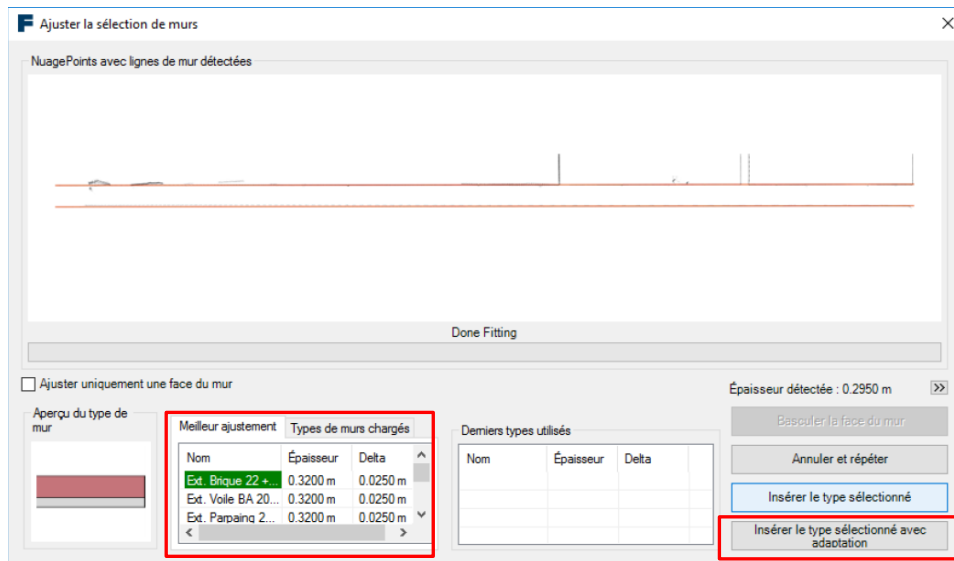


Figure 58. Résultats ajustements des murs AS-BUILT

Ici AS-BUILT propose un mur Ext. Brique de 32cm d'épaisseur avec isolant. La colonne delta présente l'écart ( $0.0250m$ ) entre le mur détecté et le mur sélectionné.

Deux options se présente ainsi à nous, la première est d'insérer le mur détecté avec son épaisseur et la deuxième d'insérer le mur et adapter une épaisseur quelconque. La deuxième option est celle qui convient car l'épaisseur du voile modélisé est de 30cm.

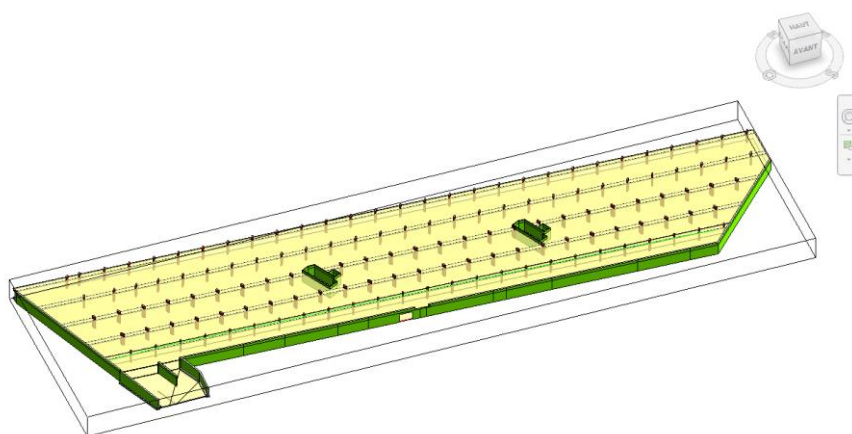


Figure 59. Niveau N-6 modélisé à partir du nuage de point

La modélisation des éléments de structure à son tour se fait selon le même principe mais à une différence, il faut travailler sur une vue 3D. Le logiciel propose une liste d'éléments structurel et des paramètres de contrainte de niveau afin bien recréer et caler la structure.

Pour cet exercice, les éléments structurels modélisés sont les piliers du niveau N-6 du parking palais des congrès à porte maillot.

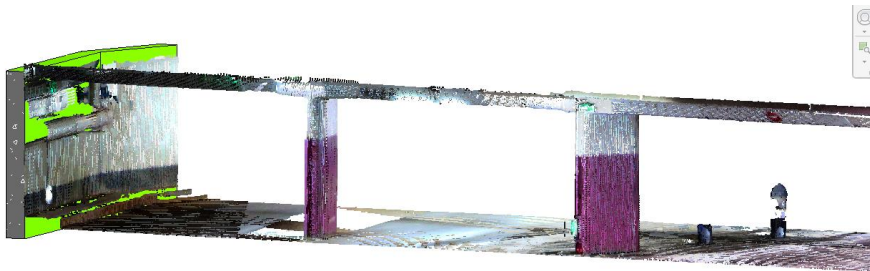


Figure 60. Nuage de points des piliers à modéliser.

Les paramètres configurés pour ces piliers sont les suivants

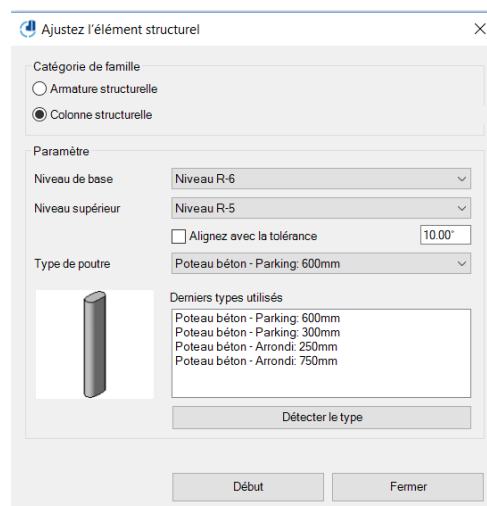


Figure 61. Paramètres de modélisation des structures.

La modélisation se fait automatiquement, il suffit de cliquer sur le haut et le bas du pilier pour obtenir le résultat. Pour améliorer le résultat de la modélisation, les paramètres de l'objet créé peuvent être modifiés (hauteur, orientation, etc.).

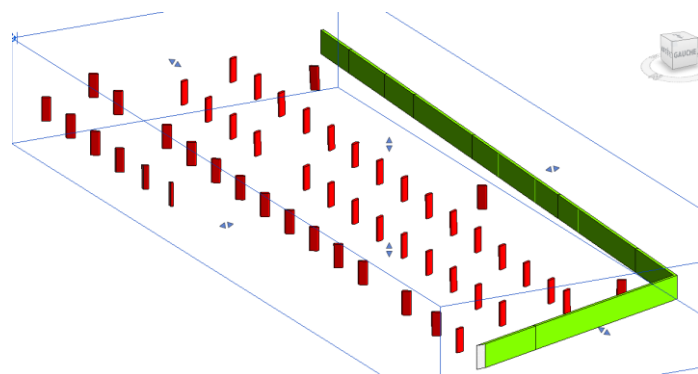


Figure 62. Piliers modélisés du niveau N-6 du parking palais des congrès.

#### 4.3.2.2. ANALYSE

L'ouvrage qui fera objet d'analyse se nomme *Puit Frontal*. Ce puit est situé sur le chantier de la nouvelle gare Porte Maillot et il a servi d'accès pour commencer à creuser des galeries à la méthode traditionnelle.

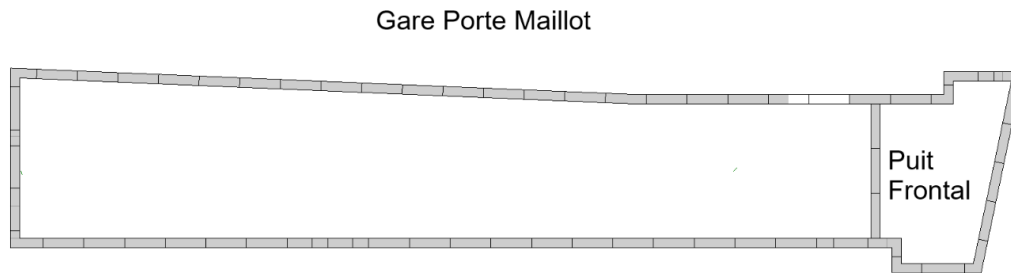


Figure 63. Vue en plan sur Puit Frontal.

Les premières études d'analyses menées ont pour but de vérifier la tolérance d'exécution des parois moulées du *puit frontal*. En partant des données sur les tolérances d'exécution et la profondeur des parois moulées du puit, une marge pour le calcul d'analyse sera établi.

Une vue en plan et en élévation sur la paroi qui sera analysée peut s'apprécier sur les images suivantes.

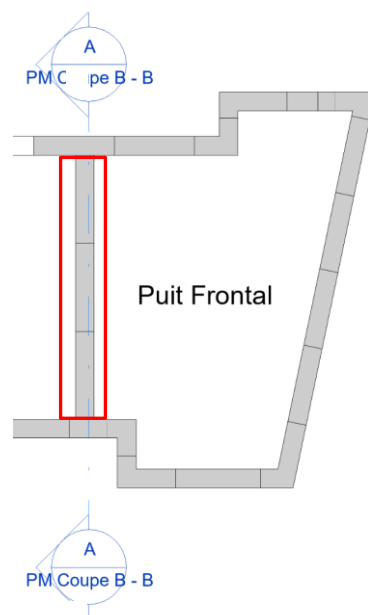


Figure 64. Vue en plan sur paroi moulée



Figure 65. Vue en élévation du nuage de point sur modèle 3D de la paroi moulée.

Pour commencer l'exercice, nous devons configurer les paramètres d'analyse afin d'obtenir des résultats cohérents.

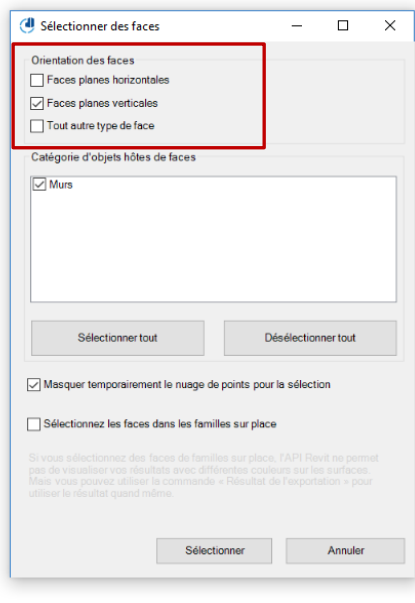


Figure 66. Paramètres configuration d'analyse AS-BUILT étape 2.

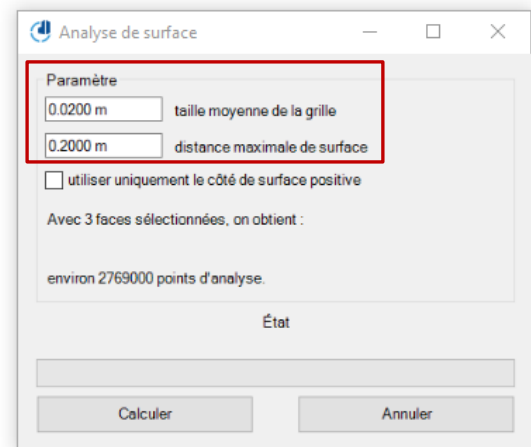


Figure 67. Paramètres configuration d'analyse AS-BUILT étape 1.

Cet exercice correspond à une analyse comparative entre le théorique (modèle 3D) et le mesuré (nuage de points). Ici AS-BUILT calcule les distances entre les points du nuage de points et les surfaces du modèle 3D, ensuite présente le résultat sous forme d'échelle des couleurs sur le modèle 3D.

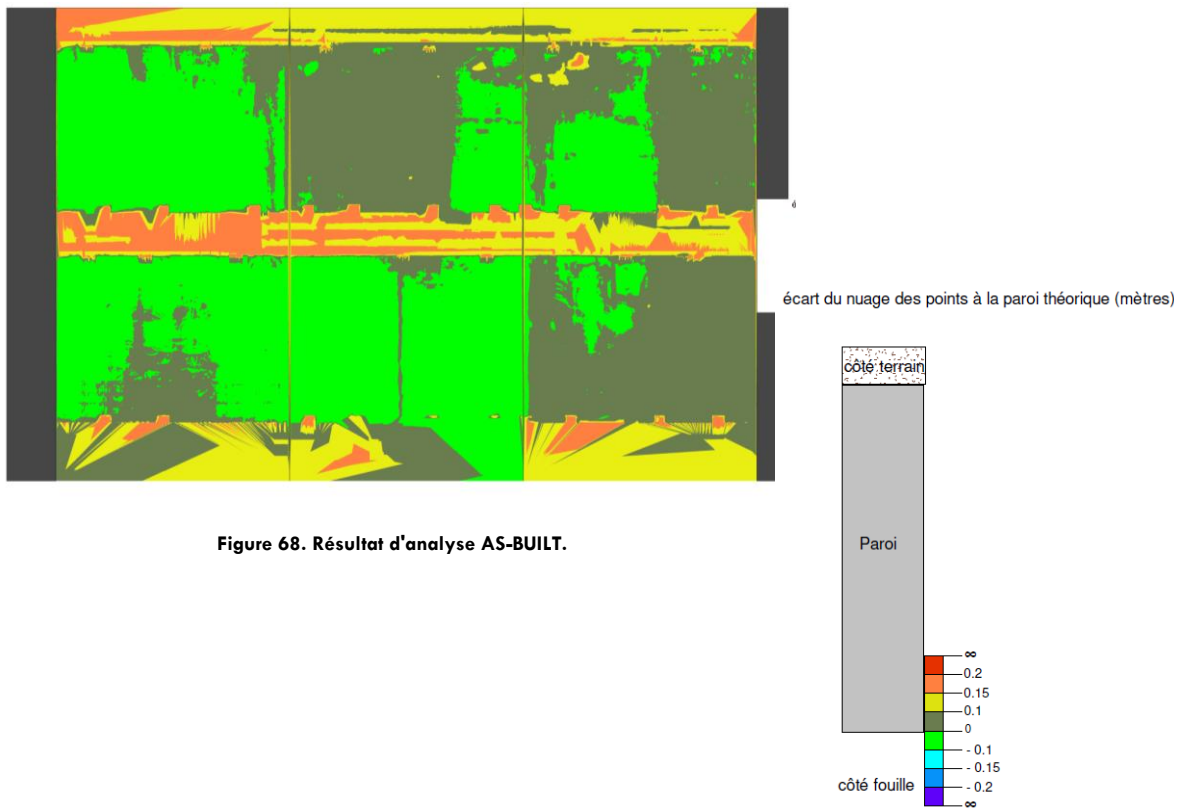


Figure 68. Résultat d'analyse AS-BUILT.

Figure 69. Echelle des couleurs analyse AS-BUILT.

La tolérance à respecter pour la profondeur actuelle du *Puit Frontal* (14m) est de  $0.095m$  du côté fouille (côté du creusement) et de  $0.120m$  du côté terrain. On observe sur l'image précédente que la majorité des écarts de distance est comprise entre  $10cm$  et  $-10cm$  sachant que le côté négatif se trouve du côté fouille. Ce résultat montre que la construction de la paroi moulée est dans les tolérances.

On peut tirer plus d'informations sur ces écarts de distances telles que la planéité ou la verticalité de la paroi moulée. Sur l'image suivante on peut apprécier une coupe sur la trace du nuage de points et la paroi moulée théorique, ceci peut servir d'exemple de contrôle de verticalité de la paroi construite.



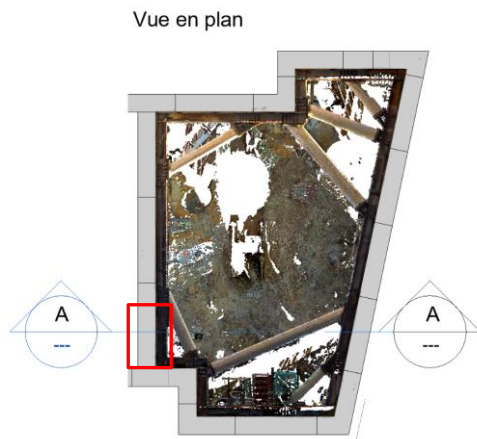


Figure 71. Vue en plan sur paroi moulée PF.

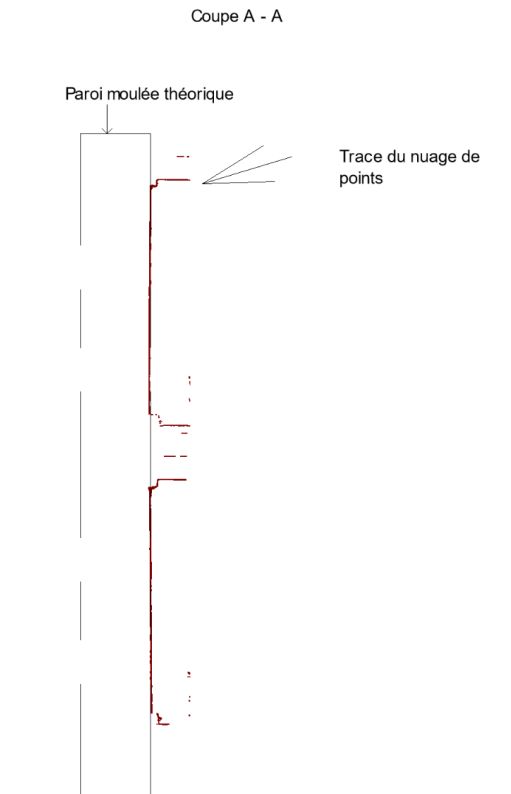


Figure 70. Coupe sur paroi moulée PF.

Suite aux tests réalisés sur AS-BUILT, la liste des points forts et faibles du logiciel par rapport à nos hypothèses de départ est détaillée dans les lignes qui suivent

#### AVANTAGES

- Travailler avec un laser scanner de FARO facilite l'importation des nuages de points dans REVIT, le problème d'échange de format est évité dans ce cas.
- Les outils d'analyses d'AS-BUILT permettent de choisir le type de surface (verticale ou horizontale) à sélectionner pour le calcul des écarts de distance.
- Les outils de modélisation sont assez précis pour reconstruire des murs, tube ou structures à partir d'un nuage de points.

#### INCONVENIENTS

- L'analyse comparative nuage vs modèle 3D ne se réalise pas correctement. Le logiciel extrapole les résultats aux zones indésirables.
- Le style d'affichage des résultats d'analyse est en grande partie géré par le progiciel. Ce dernier ne permet pas à l'utilisateur d'avoir le contrôle absolu sur l'échelle des couleurs et donc impose des valeurs avec des couleurs sur le résultat.

- AS-BUILT est un progiciel utilisé purement pour de l'analyse et modélisation, donc les détails sur le nuage de points ne sont pas appréciables. Il est plus centré sur le traitement de l'information contenu par le nuage de points que sa visualisation.

#### 4.3.3. POLYWORKS METROLOGY

POLYWORKS METROLOGY est logiciel de métrologie 3D qui emploie des scanners 3D sans contact et de dispositifs de palpation par contact afin d'acquérir et contrôler les dimensions d'outils et pièces, diagnostiquer et prévenir les problèmes de fabrication et d'assemblage, guider l'assemblage par la mesure en temps réel et contrôler la qualité de produits assemblés.

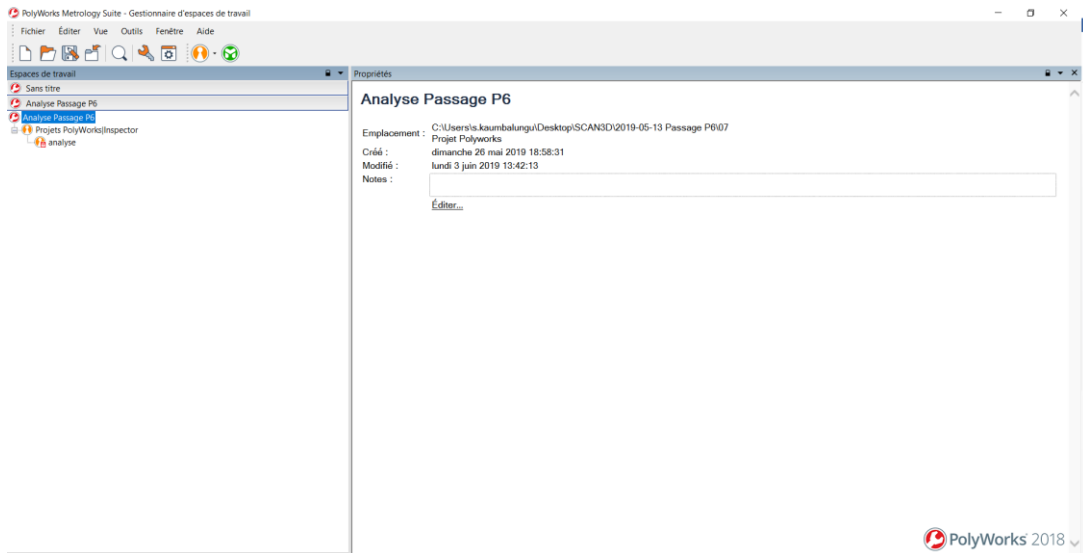


Figure 72. Interface POLYWORKS.

POLYWORKS METROLOGY est composé de deux modules importants : **Polyworks Inspector** et **Polyworks Modeler**.



Figure 73. Polyworks Inspector-Modeler.

Le premier module permet de réaliser des alignements de données sur des objets de référence, de mesurer les déviations des données des nuages de points et des modèles polygonaux par rapport aux surfaces de référence et le deuxième est le module totalement orienté à la modélisation des éléments soit en connectant directement un scanner au logiciel pour lancer ensuite le scan, soit à partir d'un nuage de point.

---

#### 4.3.3.1. MODELISATION

La modélisation avec POLYWORKS MODELER n'a pas pu être mise en pratique du fait que le logiciel est payant et que nous avons pu obtenir de la maison POLYWORKS qu'une version d'essai pour l'analyse (POLYWORKS INSPECTOR).

---

#### 4.3.3.2. ANALYSE

Le module sélectionné pour les études d'analyse comparative est Polyworks Inspector et les tests effectués sur ce logiciel concernent le nuage de point d'un couloir de correspondance.

Ce couloir a été construit pour créer une voie de déviation pour les passagers sortant de la ligne 1 de métro car une section du couloir cette ligne se trouvait sur l'emplacement des parois moulées de la nouvelle gare Porte Maillot et donc la construction du couloir de passage évite d'interrompre le trafic.

L'analyse qui sera effectuée compare le nuage de point mesuré à l'intérieur du couloir au modèle 3D de ce couloir.

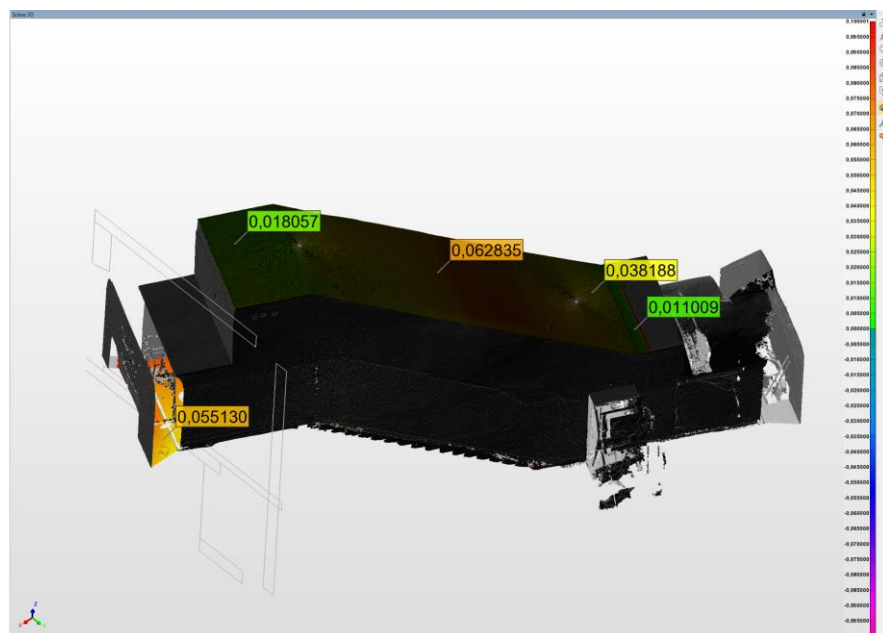


Figure 74. Analyse puit de passage P6.

Sur l'image précédente apparaissent des variations des couleurs indiquant les écarts de distances trouvées pour l'analyse comparative. Les marges employées pour ce calcul sont *10cm* et *-10cm* et les intervalles de l'échelle des couleurs ont un pas de *5mm*.

POLYWORKS METROLOGY offre des outils de travail qui sont plus adaptés à l'industrie. Pour arriver à mieux utiliser ces outils, j'ai à plusieurs reprises échangé avec leur service informatique, qui n'avait jamais exploité sur ce logiciel un nuage de points aussi lourd.

Après ces échanges, j'ai conclu que le logiciel ne répondrait pas à nos attentes et ensuite j'ai dressé la liste de ses points forts et faibles qui sont détaillés dans les lignes suivantes

#### **AVANTAGES**

- A chaque importation des nuages de points, POLYWORKS demande de géoréférencer le nuage et propose une unité de mesure.
- Le logiciel peut réaliser un assemblage des nuages de points en les alignant selon une meilleure position (Best-fit).

#### **INCONVENIENTS**

- POLYWORKS a du mal à gérer l'importation de certains formats de fichiers rendant ainsi les nuages de points importés inexploitable.
- La manipulation des données se ralentit lorsque le fichier importé est lourd. Cas de nuage de points des ouvrages.
- Le logiciel est plus habile avec des nuages de points légers, cela l'oriente plus dans le domaine de l'industrie et rend son utilisation pour les travaux publics un peu complexe.

---

#### 4.3.4. BUILDIT CONSTRUCTION

BUILDIT CONSTRUCTION est un outil de gestion totalement intégré au cycle de vie du bâtiment pour les processus d'assurance qualité (AQ) et de contrôle qualité (CQ). Il permet aux professionnels de la construction de suivre les projets en comparant en temps réel les modèles de conception assisté par ordinateur (CAO) aux données 3D numérisées.

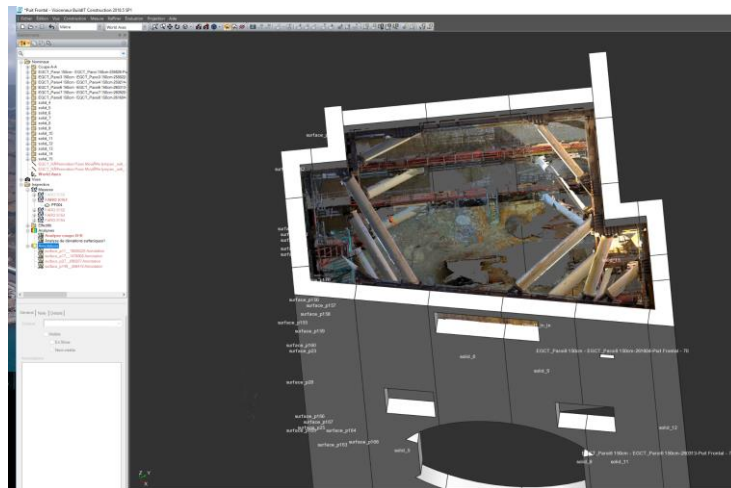


Figure 75. Espace de travail BUILDIT.

En plus de quantifier différents aspects comme la planéité et le niveau des sols ou l'aplomb des murs, BUILDIT Construction permet une comparaison précise avec les fichiers de conceptions d'origine ou la maquette numérique (BIM), une analyse de la déformation du réservoir, en prenant en compte les changements de position des sols, poutres en acier, murs, colonnes, fenêtres et de portes.

---

##### 4.3.4.1. ASSEMBLAGE

Le logiciel permet de réaliser un assemblage des nuages de points en calant les nuages à partir des positions déterminées par l'utilisateur, C'est le *Best-fit*. Cette manipulation peut s'avérer efficace si le but de la campagne de scan est une simple visualisation des objets scannés. Dans notre cas, il n'est clairement pas efficace vu que l'on perd énormément en précision.

#### 4.3.4.2. MODELISATION

BUIDLIT ne possède pas des outils de modélisation proprement dit, pour modéliser des objets il a besoin de construire un maillage du nuage de points.

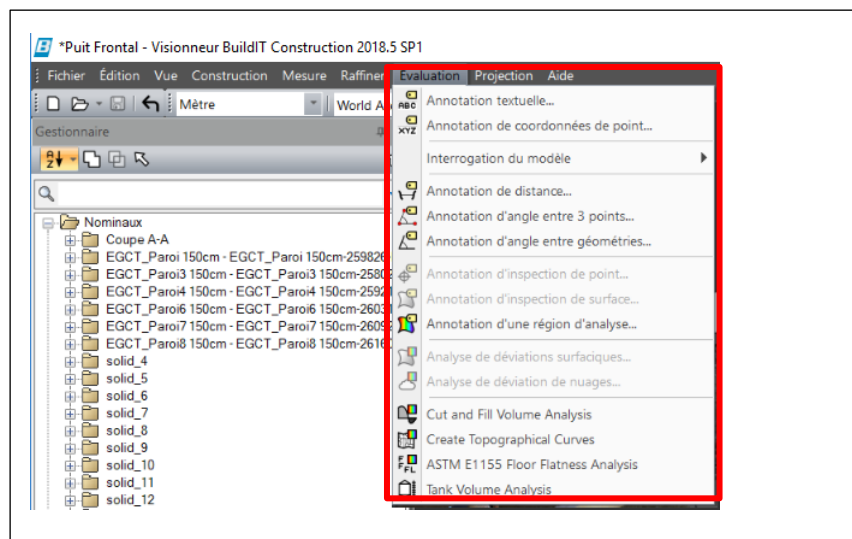
La construction du maillage se fait automatiquement en passant par l'onglet approprié. Un résultat du maillage de avec BUIDIT peut s'apprécier sur l'image suivante.



Figure 76. Résultat du maillage sur BUIDIT.

#### 4.3.4.3. ANALYSE

BUIDIT s'interface directement avec le laser scanner FARO FOCUS, ainsi qu'avec les suiveurs laser, les stations totales et les projecteurs laser. Ces particularités lui permettent de mieux gérer les nuages de points sortant des lasers scanners mentionnés précédemment.



Les analyses qui seront effectuées sur BUILDIT sont similaires à celles effectuées avec le logiciel AS-BUILT. Il est question ici de trouver des résultats significatifs afin de les comparer à ceux d'AS-BUILT et voir lequel des deux logiciels est le plus performant.

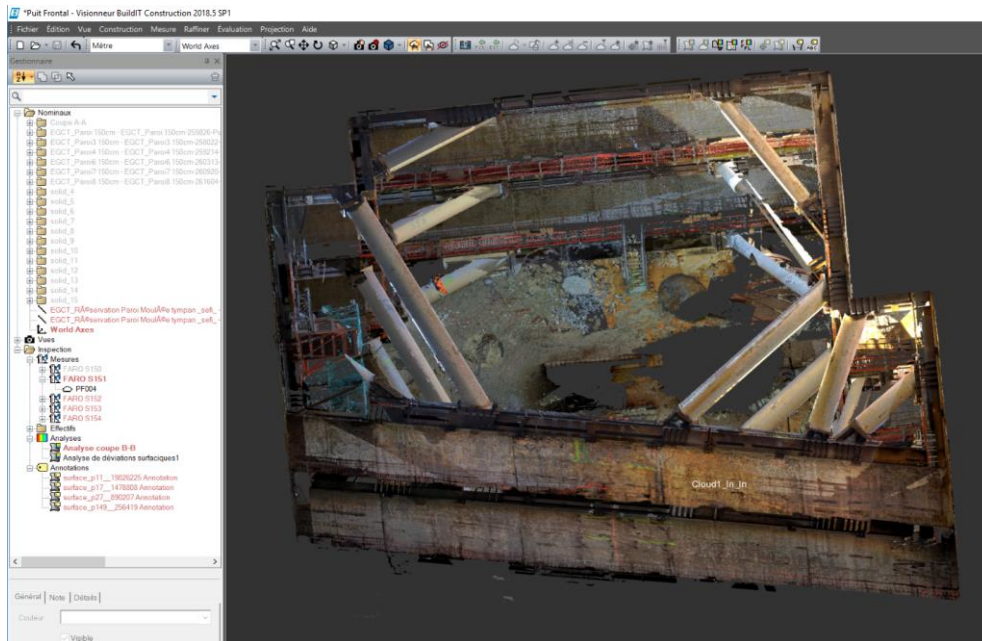


Figure 77. Vue sur nuage de points du Puit Frontal sur BUILDIT.

De la même manière que sur AS-BUILT, le calcul s'effectuera sur la même paroi moulée avec les mêmes paramètres de calcul et d'affichage du résultat.

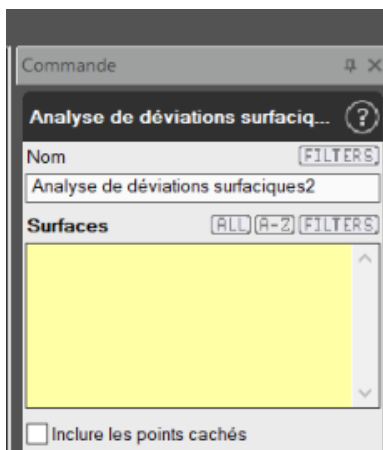


Figure 80. Configuration des paramètres d'analyse étape 1

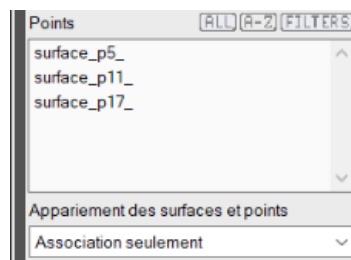


Figure 79. Configuration des paramètres d'analyse étape 2.

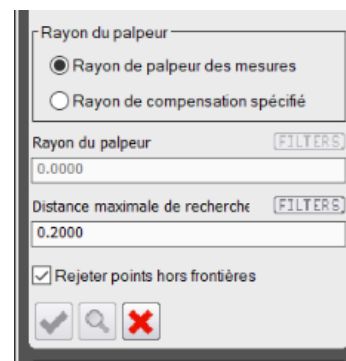


Figure 78. Configuration des paramètres d'analyse étape 3.

Après son calcul de déviation surfacique, BUILDIT trouve le résultat suivant

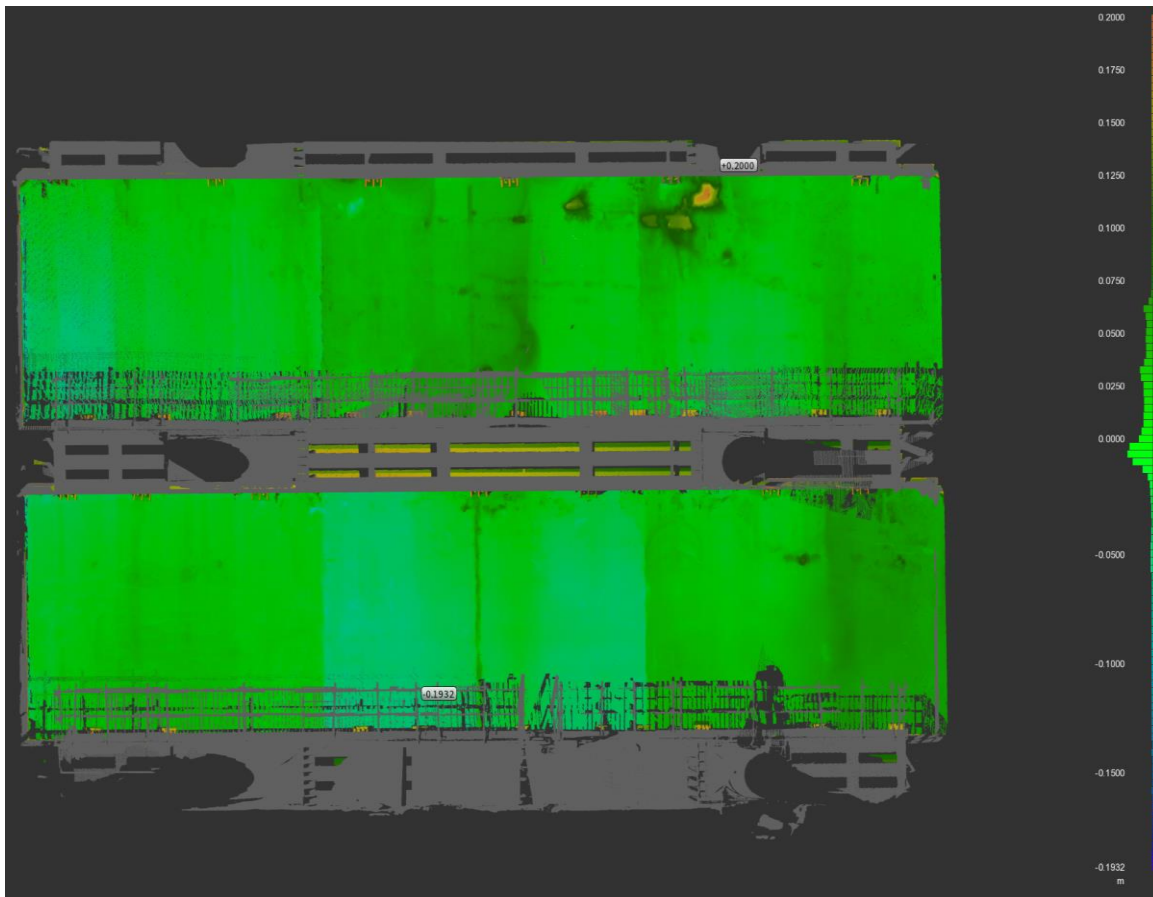


Figure 81. Résultat d'analyse du Puit frontal BUILDIT.

Sur l'image précédente, on peut remarquer que BUILDIT trouve des résultats différents à ceux d'AS-BUILT. Cela est dû au fait que les deux logiciels emploient des algorithmes différents pour leur calcul et qu'au niveau de l'affichage du résultat BUILDIT ne permet qu'un affichage des couleurs *dégradé* et non par *plages* comme sur AS-BUILT.

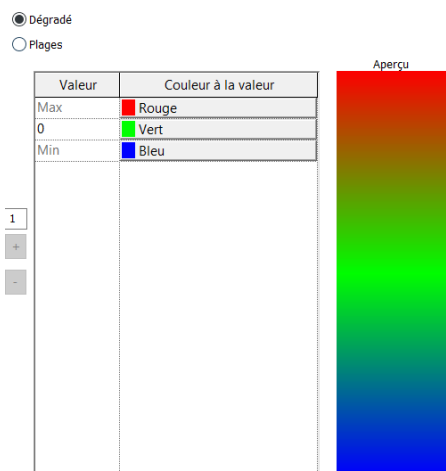


Figure 83. Affichage échelle des couleurs par dégradé.



Figure 82. Affichage échelle des couleurs par plages.



BUILDIT est un logiciel avec un point particulier, son espace de travail a une limite de coordonnées. Pour trouver des solutions à ce problème, je suis entré en contact avec leur service technique et la solution proposée a été d'appliquer une translation (offset) aux coordonnées du nuage de points. Cette technique ne répond absolument pas à nos attentes.

Pour clore le travail effectué sur BUILDIT, la liste des points forts et faibles du logiciel est détaillée dans les lignes suivantes

#### **AVANTAGES**

- Le logiciel permet de réaliser de l'assemblage ou aligner un nuage de points à un modèle 3D en utilisant l'option *Best-fit*.
- BUILDIT contient un outil de sélection manuelle des points qui permet de nettoyer correctement son nuage de points.
- Le logiciel permet la modélisation 3D à partir de la création des maillages du nuage de points.
- BUILDIT est capable de réaliser de l'analyse comparative mais seulement il faut s'assurer de projeter le résultat du calcul sur le nuage de points et non sur le modèle 3D.

#### **INCONVENIENTS**

- BUILDIT a un espace de travail limité à 10km par rapport à l'origine des axes. Il est donc difficile de travailler avec un nuage de points géoréférencé. L'application d'un offset sur les coordonnées est nécessaire dans ce genre de situation.
- La procédure d'analyse comparative peut s'avérer longue, cela dépend du nombre de face que contient le modèle 3D. L'analyse requiert une association préalable du nuage de points aux faces du modèle 3D pour être effectuée.
- L'échelle des couleurs pour la présentation du rapport d'analyse reste à améliorer. Le logiciel a toujours tendance à imposer certaines valeurs de son calcul sur l'échelle.
- La navigation dans l'espace de travail n'est pas assez intuitive. La manipulation du nuage de point demande un peu de pratique.

---

#### 4.3.5. TRIMBLE REALWORKS

TRIMBLE REALWORKS est un logiciel de traitement et analyse des nuages de points. Le logiciel permet d'enregistrer, analyser, modéliser et créer des livrables en toute efficacité, à l'aide de données provenant de pratiquement n'importe quelle source.

Les tests sur ce logiciel ne faisaient pas parti du planning mais nous nous retrouvons avec une certaine avance et nous avons donc décidé de l'insérer sur la liste des logiciels à tester, toujours dans le but de trouver des solutions qui pourraient répondre à nos attentes.

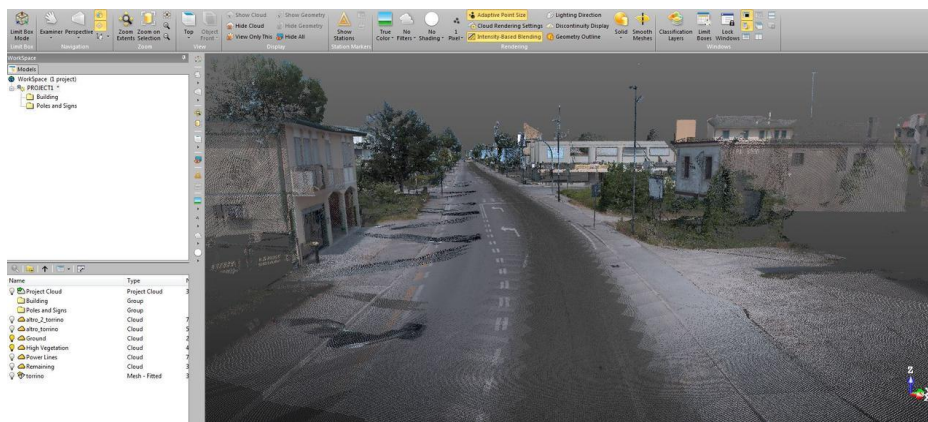


Figure 84. Interface TRIMBLE REALWORKS.

L'interface du logiciel propose une variété d'outils allant de l'assemblage, analyse à la modélisation. L'assemblage sur TRIMBLE REALWORKS est assez similaire à celle du logiciel SCENE, il permet de sélection des sphères, cibles ou points caractéristiques pour assembler les nuages de points.

Le logiciel étant d'essai pour une courte durée, cela n'a pas permis de pousser loin dans l'analyse et la modélisation.

---

### 4.3.6. AMBERG TUNNEL

AMBERG TUNNEL est un logiciel de la maison AMBERG TECHNOLOGIES qui prend en charge la création de tunnels dans toutes les phases de construction. Le système solutions sous le nom générique d'AMBERG TUNNEL combine instruments de mesure précis avec logiciel spécifique des tâches.

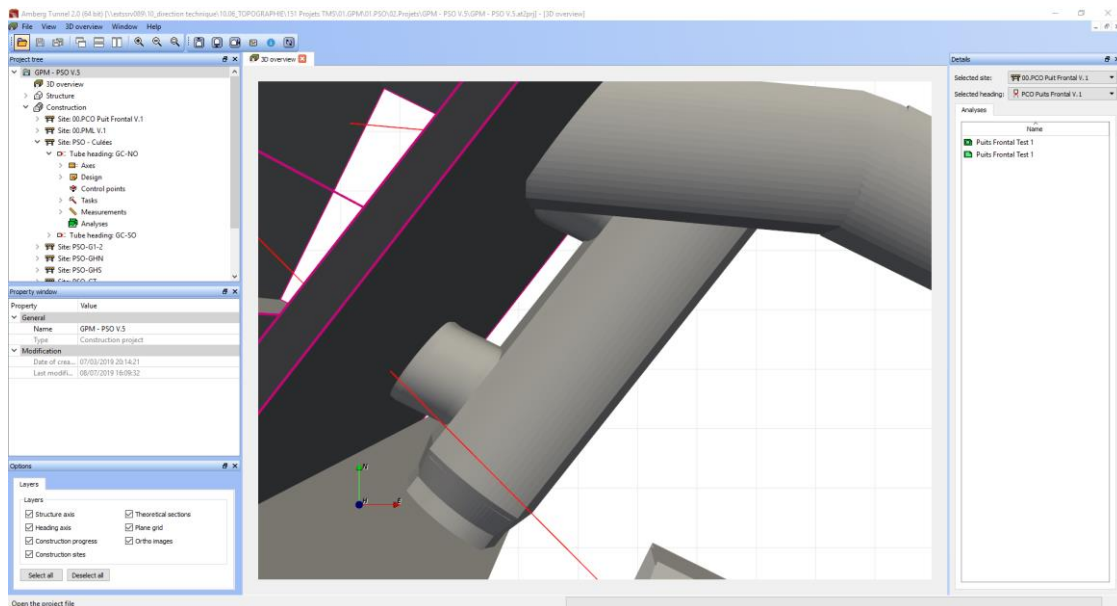


Figure 85. Espace de travail AMBERG TUNNEL.

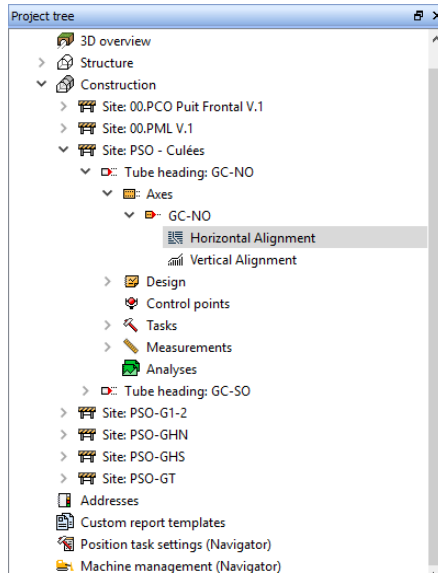
Le module AMBERG TUNNEL est plus orienté aux ouvrages de tunnel et de puit.

---

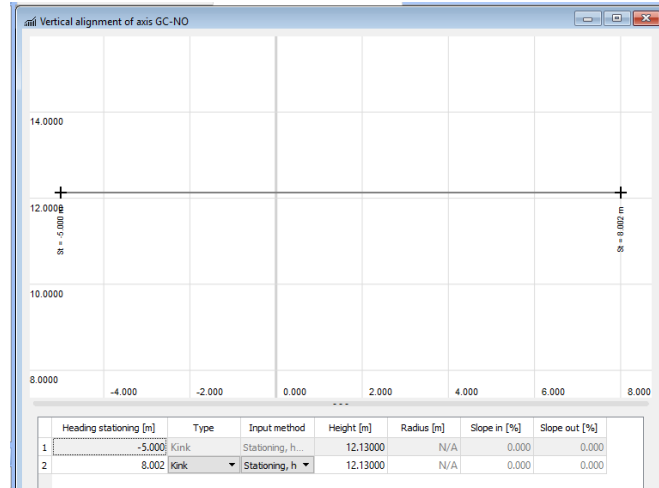
#### 4.3.6.1. ANALYSE

Le logiciel ne travaille qu'avec des axes, de ce fait lors de la création du projet il est nécessaire de définir un axe et le point métrique (PM) de cet axe à partir d'une vue en plan et en profil en long.

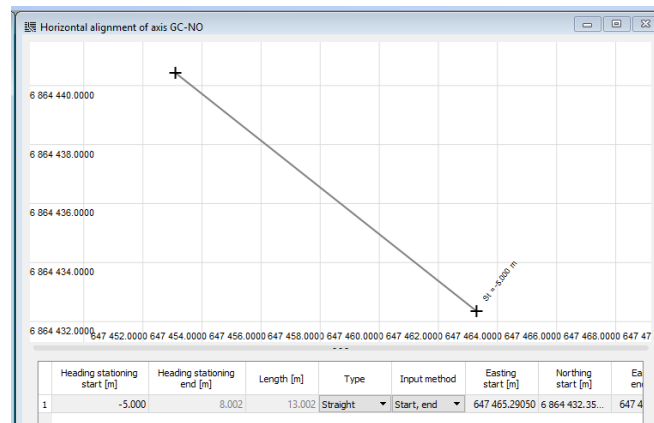
L'ouvrage utilisé pour le prochain exercice est une galerie (*galerie de recul*) extérieure au chantier qui a été creusée par méthode traditionnelle et dont l'objet d'étude est d'obtenir les zones hors et sous profils de la galerie.



**Figure 87. Arborescence de travail sur AMBERG TUNNEL.**



**Figure 86. Vue en plan de l'axe défini sur AMBERG TUNNEL.**



**Figure 88. Profil en long de l'axe défini sur AMBERG TUNNEL.**

L'obtention des zones hors et sous profil passe par une comparaison du profil théorique au profil mesuré (obtenu à partir du nuage de points). A partir de l'onglet *Design* dans l'arborescence du logiciel, nous définissons le profil théorique en introduisant ses paramètres géométriques pour tout le long de l'axe.

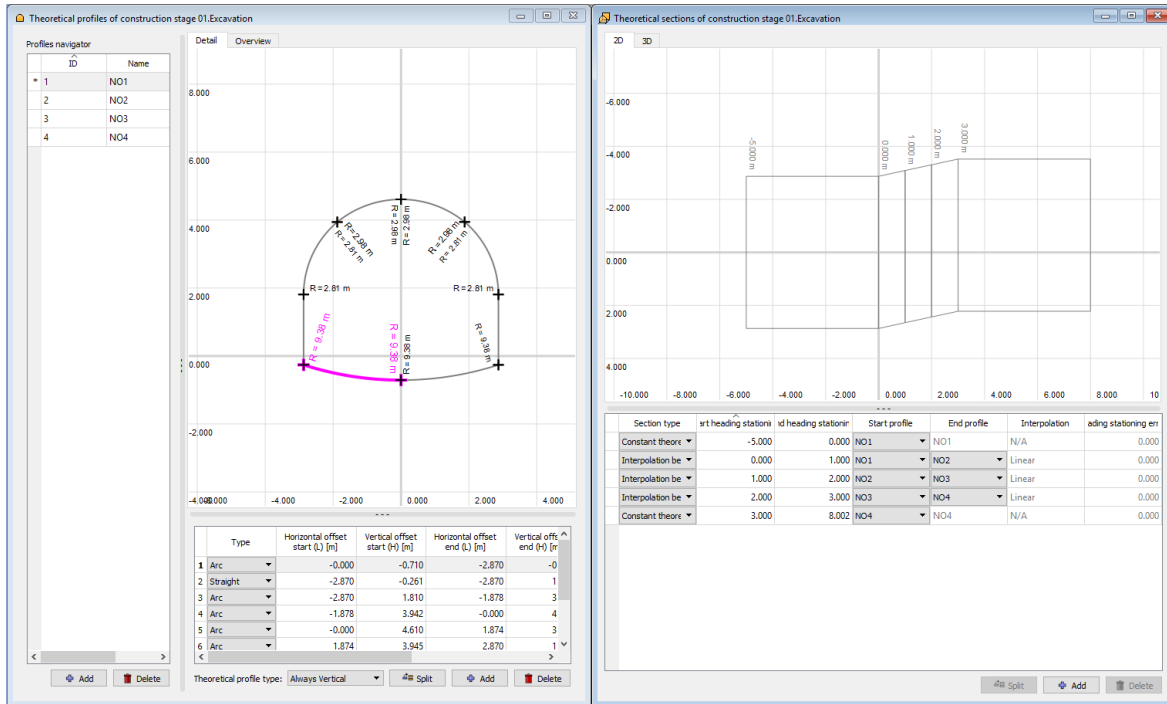


Figure 89. Définition des paramètres géométriques des profils appliqués sur le long de l'axe

Le profil étant bien défini, les mesures peuvent ainsi être importées pour procéder à l'analyse comparative des profils. Pour l'importation des données, plusieurs formats de fichiers sont supportés dans AMBERG TUNNEL.

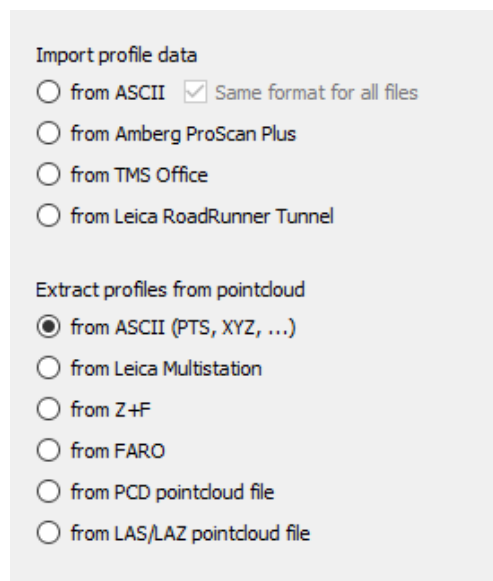


Figure 90. Formats de fichiers supportés par AMBERG TUNNEL.

Les données d'entrée correspondent soit à des mesures directement prises à la station totale soit à un nuage de points obtenu à l'aide d'un scanner 3D. Sur l'image suivante, on peut apprécier le résultat d'importation des mesures provenant d'une station totale.

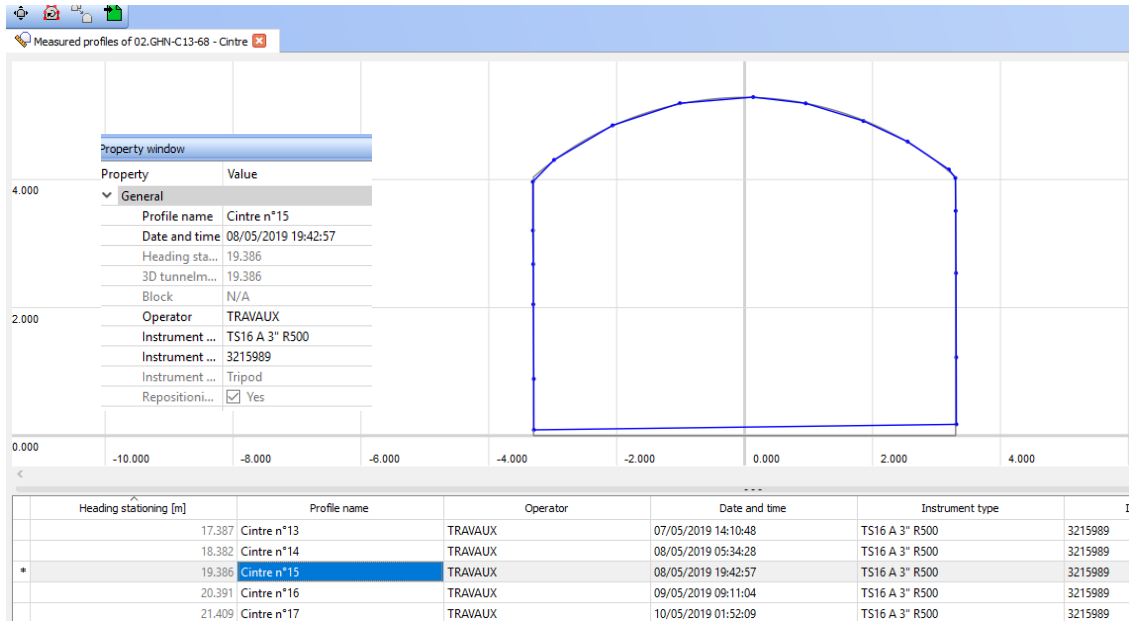


Figure 91. Résultat d'importation des mesures d'une station totale sur AMBERG TUNNEL.

AMBERG TUNNEL génère automatiquement le profil du nuage de points importé, mais seulement avant l'importation du nuage de points il est important de définir les paramètres d'extraction des profils pour une meilleure analyse.

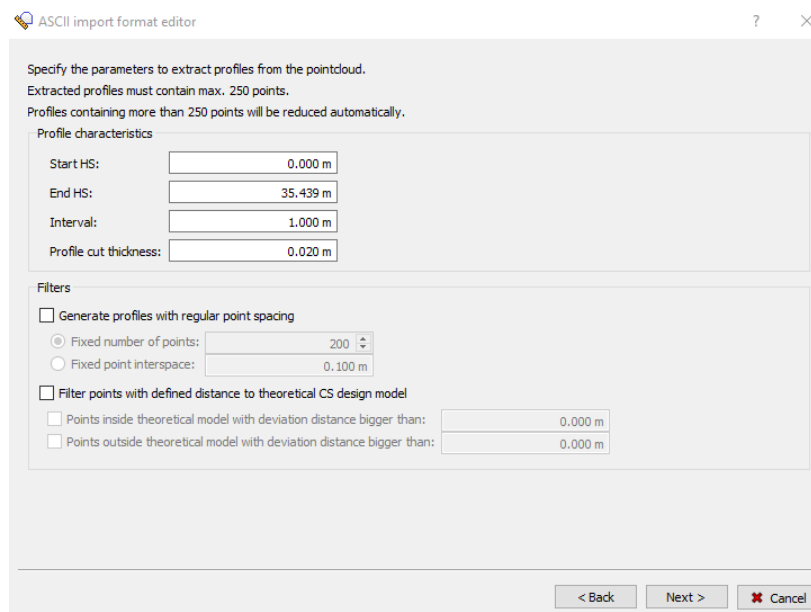


Figure 92. Paramètres d'importation du nuage de points sur AMBERG TUNNEL.

Le résultat d'importation du nuage de points se présente tel que suit

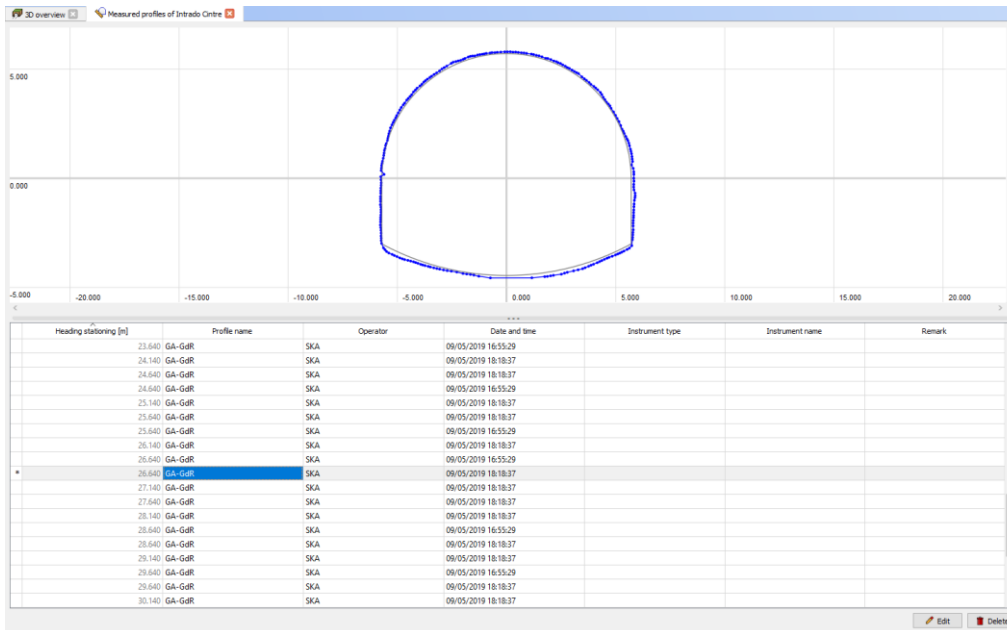


Figure 93. Résultat d'importation du nuage de points sur AMBERG TUNNEL.

Une fois que tous les profils sont importés, l'analyse des profils peut être lancée. Le logiciel présente le résultat de la manière suivante

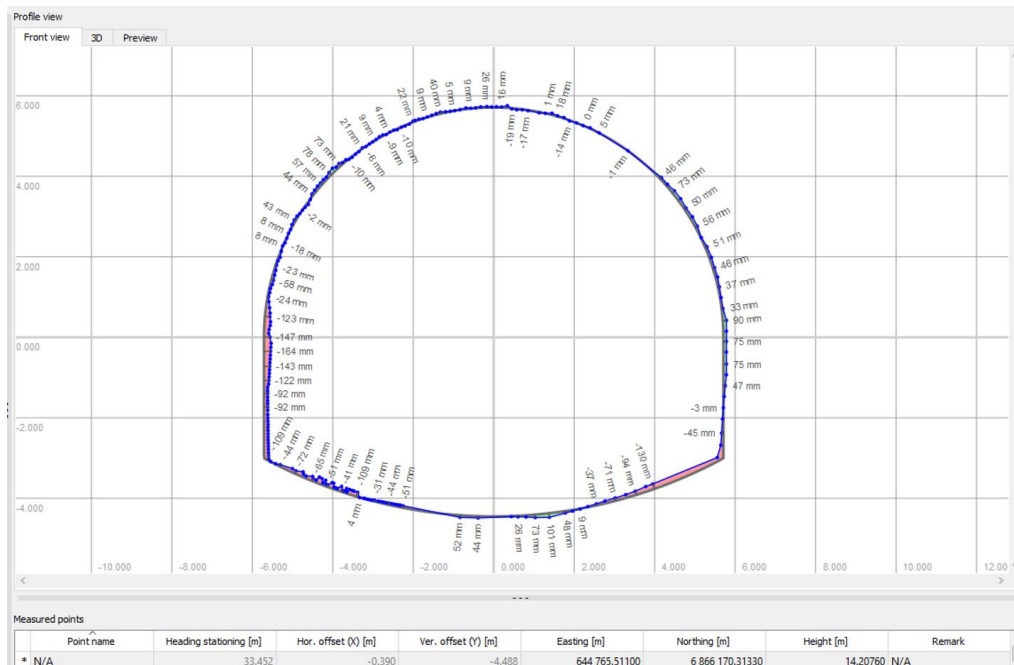


Figure 94. Résultat de l'analyse des profils sur AMBERG TUNNEL.

Dans cet exercice, l'analyse des profils vise à vérifier que les cintres de la galerie ont été posés dans les tolérances. Pour ce cintre, les valeurs d'analyses varient entre  $-3\text{mm}$  et  $22\text{mm}$  qui sont acceptables pour la pose des cintres.

AMBERG TECHNOLOGIES possède également un module qui permet l'importation complète du nuage de points ainsi qu'une visualisation de ce nuage, il s'agit d'AMBERG TUNNELSCAN. Ce module permet d'obtenir une analyse comparative (théorique vs mesuré) colorée ainsi qu'un rendu développé autour d'un axe (voir annexe 4).

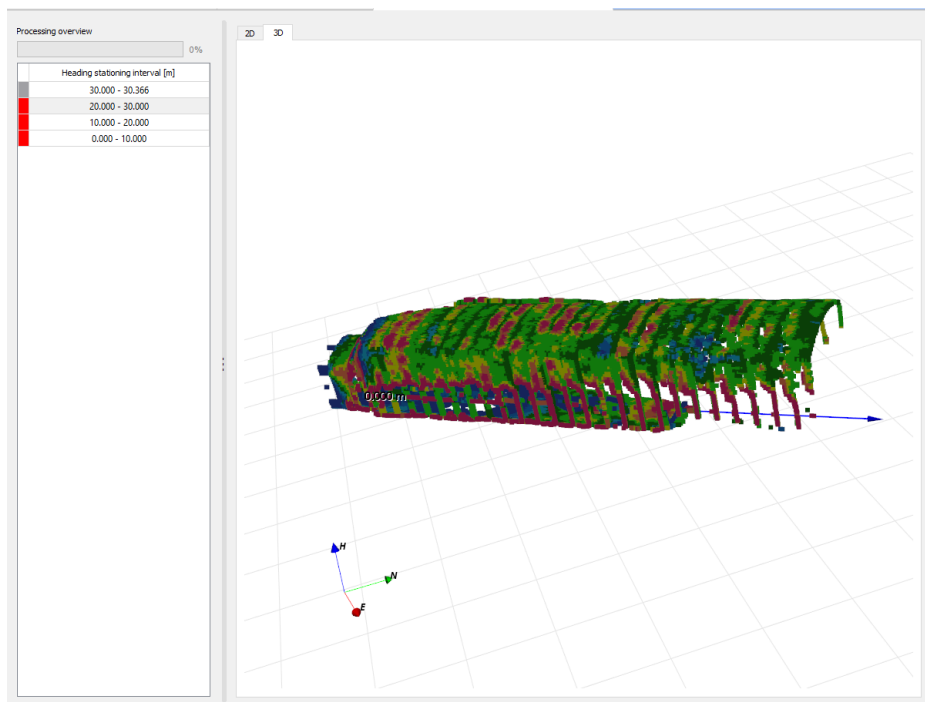


Figure 95. Espace de travail AMBERG TUNNELSCAN.

Ainsi pour terminer les analyses effectuées sur ce logiciel, la liste de ses points forts et faibles est dressée de la manière suivante.

#### AVANTAGES

- Import et traitement des mesures rapides (mesures stations totales et nuages de points)
- Génération de coupes automatiques à partir de nuages de points (avec différents paramètres de création).
- Analyse comparative avec le théorique par profil.



- Le module TUNNELSCAN permet une analyse plus poussée : colorimétrie du nuage de points et développé de l'analyse selon l'axe du tunnel ou du puit.
- Possibilités d'importer de nombreux formats.

#### **INCONVENIENTS**

- La définition du théorique ainsi que l'analyse sont limitées à des tunnels ou des puits de section géométrique simple.
- Définition du théorique très fastidieuse avec impossibilité d'import de maquettes 3D.
- Les imports pour la création du théorique mais aussi des mesures présentent de nombreux bugs (exemple: le même DXF de profile théorique qui ne s'importe pas d'une fois à l'autre).
- TUNNELSCAN est un module supplémentaire payant.
- Possibilité avec TUNNELSCAN d'assembler les scans, mais l'assemblage n'est pas performant.
- Rendu colorimétrique grossier (très pixélisé)
- Outil de rapport très limité
- Le nuage de points doit être nettoyé avant son importation sinon le résultat de l'importation sera grossier.

---

### 4.3.7. 3D RESHAPER

3D RESHAPER est un logiciel dédié au traitement de nuage de point pour de nombreuses applications. Du nuage de point aux livrables, de l'ingénierie au patrimoine, de la topographie à l'industrie. Il est également capable de réaliser de la modélisation 3D et de l'inspection.

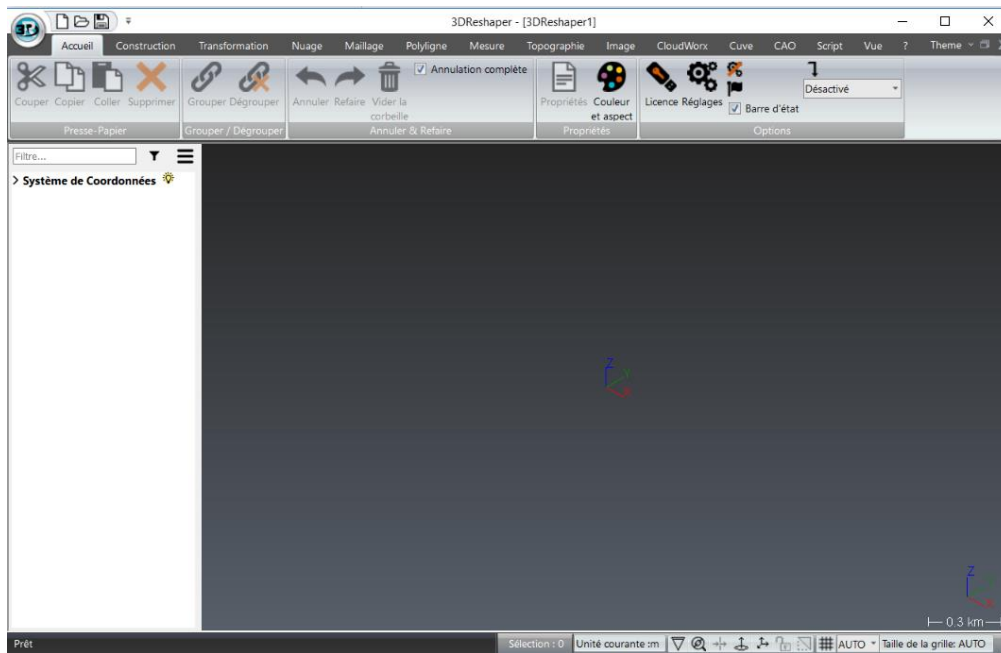


Figure 96. Espace de travail 3D RESHAPER.

---

#### 4.3.7.1. ASSEMBLAGE

3D RESHAPER contient des outils qui permettent de réaliser de l'assemblage entre nuages de points ou aligner un nuage sur un modèle 3D. Cet assemblage peut se faire soit en déterminant des points identiques sur les différents nuages soit par *Best-fit*.

Pour essayer les capacités d'assemblage du logiciel, deux scans bruts ont été importés en format FLS.

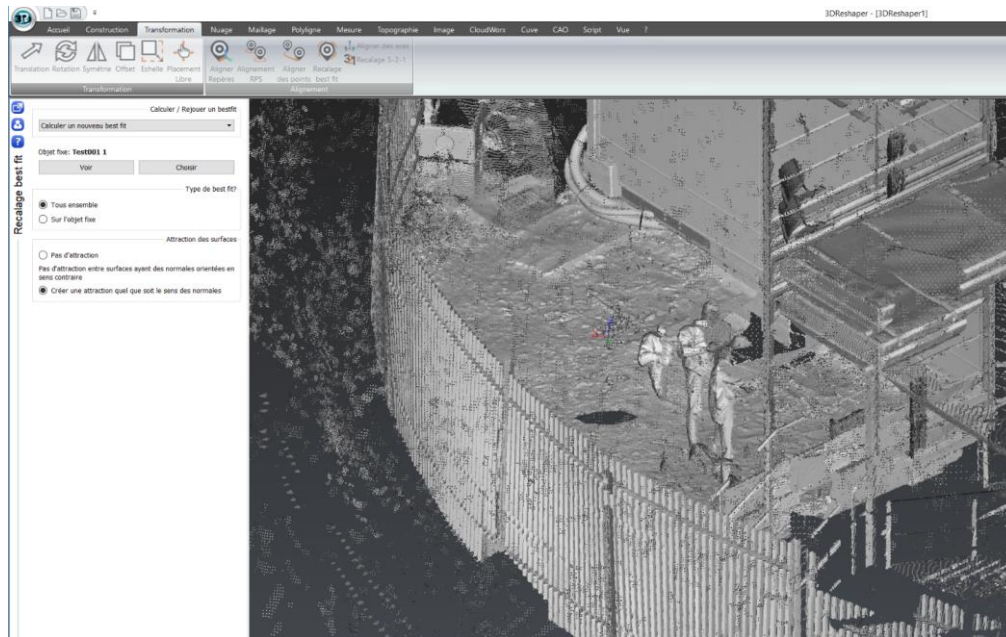


Figure 97. Assemblage par Best-fit sur 3D RESHAPER.

Après calcul par Best-fit, le logiciel trouve les résultats suivants

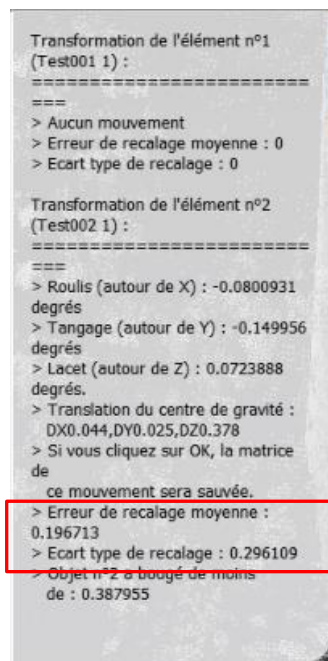


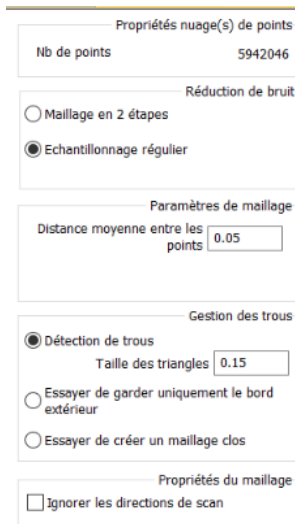
Figure 98. Résultat d'assemblage par Best-fit sur 3D RESHAPER.

L'assemblage a été effectué avec une erreur de recalage moyenne de  $0.1967m$  et un écart type de recalage de  $0.2961m$ . Ces valeurs sont considérables, étant donné qu'avec le logiciel SCENE nous obtenons des résultats d'assemblage qui varient entre  $2mm$  à  $4mm$ .

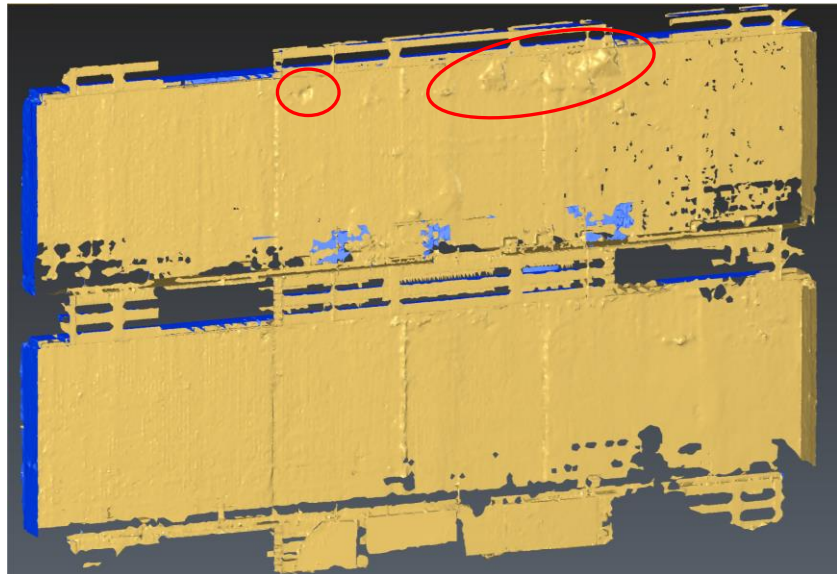
---

#### 4.3.7.2. MODELISATION

La modélisation sur 3D RESHAPER se fait par une construction des mailles à partir du nuage de points. Les paramètres à configurer sont la distance moyenne entre les points et la taille des triangles.



**Figure 100. Paramètres de configuration d'un maillage sur 3D RESHAPER.**



**Figure 99. Résultats du maillage et présence des bosses et creux sur 3D RESHAPER.**

Le maillage n'a pas pour but uniquement d'obtenir un modèle 3D de l'objet scanné, il apporte aussi certaines informations sur l'état de l'objet. Dans ce cas, on peut remarquer que notre paroi n'est pas complètement propre et qu'il existe des zones creuses et bossues (Zones encadrées sur l'image précédente).

---

#### 4.3.7.3. ANALYSE

Sur 3D RESHAPER diverses analyses seront effectuées, en commençant par une analyse comparative du *Puit frontal* puis les exercices seront poussés sur d'autres ouvrages.

Similairement à AS-BUILT et BUILDIT, les tests qui seront effectués sur 3D RESHAPER auront le même but, qui est de comparer les méthodes de calculs ainsi que les résultats trouvés sur chaque logiciel.

L'importation des nuages de points peut se faire sous plusieurs formats (*voir annexe 2*), cela évite le problème d'interopérabilité à ce niveau.



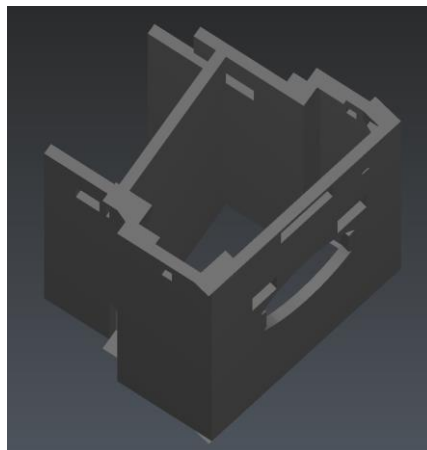
**Figure 101. Affichage du nuage de points sur 3D RESHAPER.**

Une fois le nuage importé, la prochaine opération consiste à importer le modèle 3D. Cette opération paraît simple mais en réalité elle est complexe.

Les modèles 3D utilisés sur le chantier ont été conçus sur le logiciel REVIT et pour l'importation des modèles 3D sur 3D RESHAPER les formats acceptés sont IGS ou STEP, formats non supportés par REVIT.

Après des nombreux essais d'importation, j'ai finalement mis en place une procédure (*voir annexe 5*) d'importation des modèles 3D géoréférencés sur 3D RESHAPER.

Le modèle du Puit frontal ainsi importé se présente tel que suit



**Figure 102. Modèle 3D du puit frontal importé sur 3D**

Ici nous visons d'analyser la même paroi que sur AS-BUILT et BUILDIT.



Figure 103. Superposition du nuage de points sur le modèle 3D dans 3D RESHAPER.

Une fois que toutes les données ont été importées, l'analyse se fera par un simple clic à l'onglet adapté. Les paramètres définis pour le calcul sont identiques à ceux utilisés avec les logiciels cités précédemment. Ainsi, nous utiliserons une limite de calcul allant jusqu'à 20cm et une échelle des couleurs avec un pas 5cm.

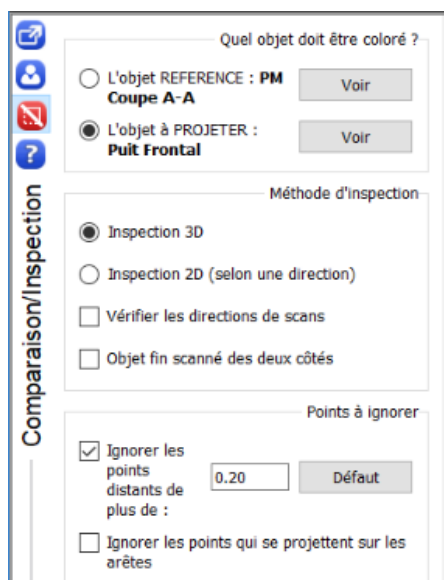


Figure 105. Paramètres de configuration de l'analyse comparative sur 3DR.

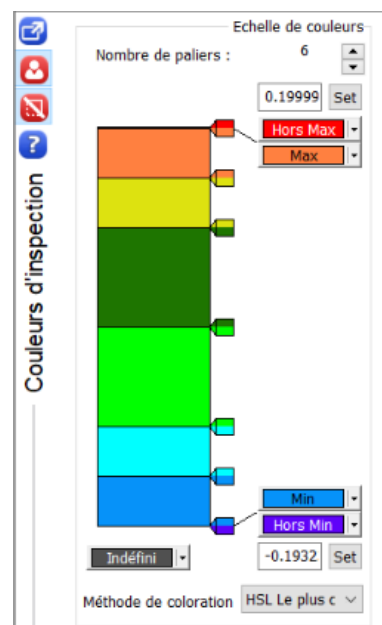


Figure 104. Palette des couleurs sur 3DR.

Le résultat trouvé par 3D RESHAPER se présente de la manière suivante

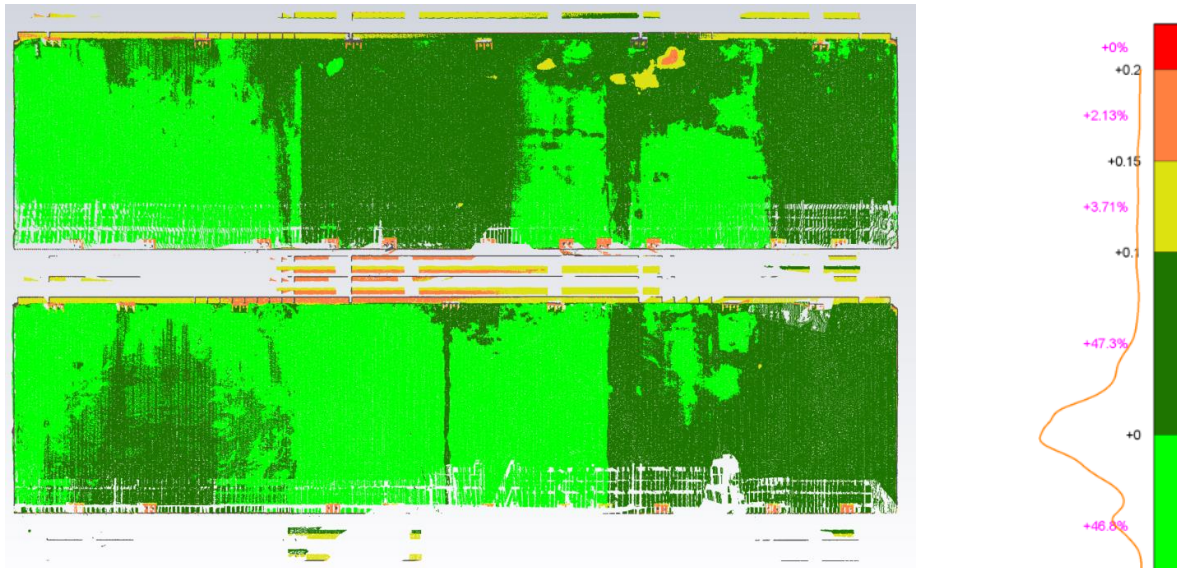


Figure 106. Résultat d'analyse comparative 3DR.

Le logiciel trouve une grande partie des valeurs entre  $10\text{cm}$  et  $-10\text{cm}$  ce qui rentre largement dans les tolérances pour la profondeur du puit. Nous voyons que 3D RESHAPER trouve sur certaines zones des valeurs différentes aux autres logiciels, cela sera expliqué dans le point *Comparaison*.

Afin de tester toutes les fonctionnalités du logiciel, une analyse des profils sera également réalisée. L'ouvrage qui fera objet d'analyse est la galerie précédemment analysée avec AMBERG TUNNEL.

A partir du modèle 3D et l'axe de la galerie importé sur 3D RESHAPER, le profil théorique sera extrait automatiquement.

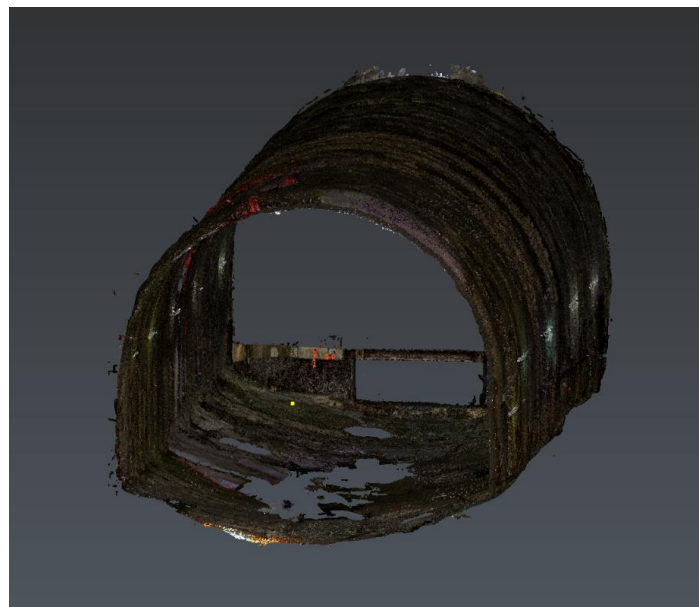


Figure 107. Nuage de points galerie de recul sur 3DR.

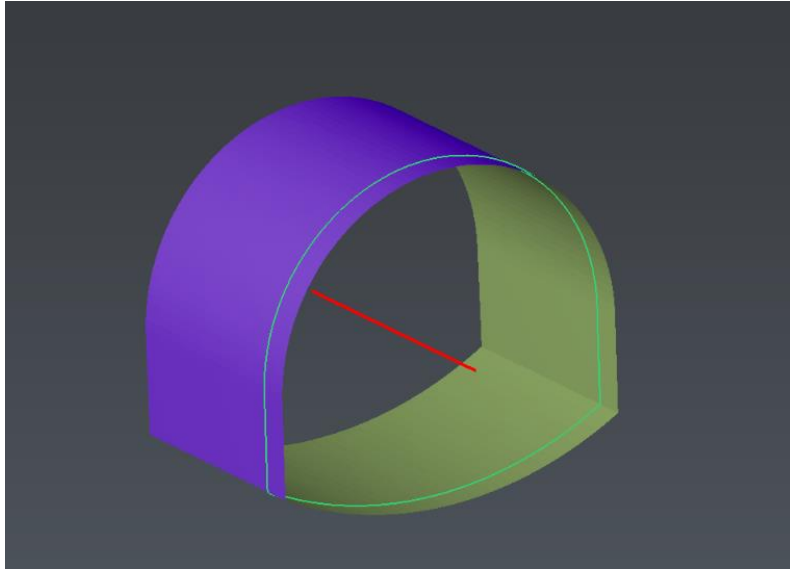


Figure 108. Extraction automatique du profil théorique sur 3DR.

Ensuite à l'aide de l'outil de comparaison des profils, le profil du nuage de points sera généré puis comparé au profil théorique sur tout le long de l'axe de la galerie.

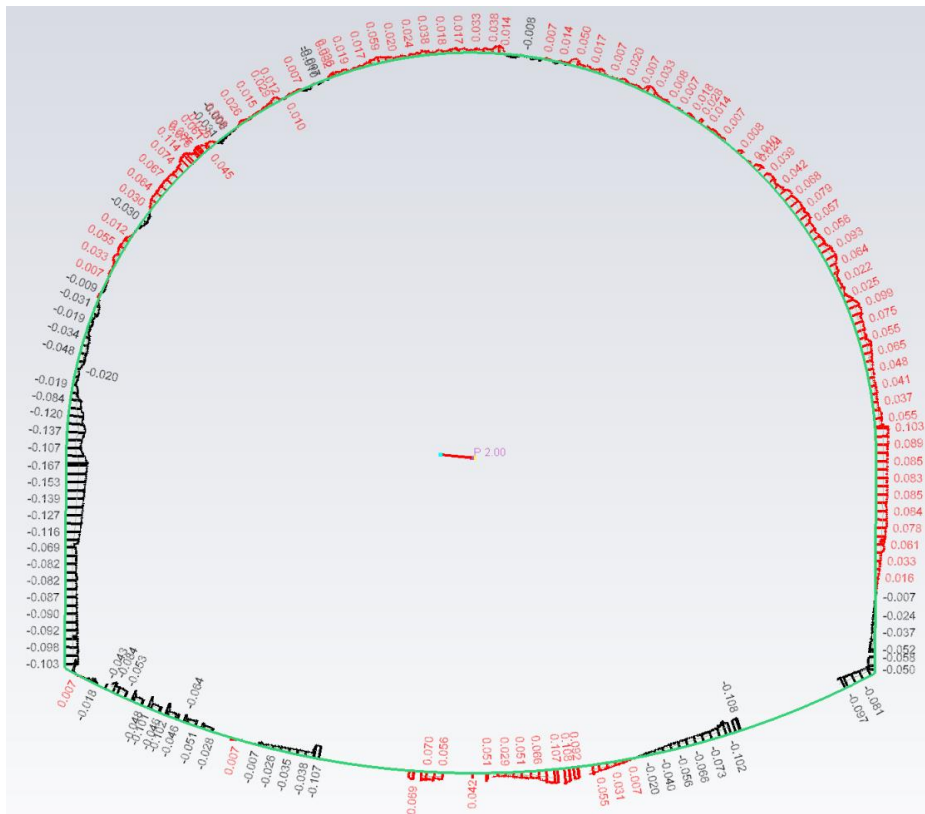


Figure 109. Résultat de l'analyse des profils sur 3DR.

Sur l'image précédente on peut apprécier une coupe avec les zones hors et sous profils qui varient entre -17cm et 13cm. Les résultats montrent des grands écarts de distance par rapport au profil théorique.



3D RESHAPER permet également de dessiner des points, lignes et polygones à partir du nuage de points. Ces opérations sont intéressantes car elles peuvent servir pour effectuer des plans de récolement. Les dessins effectués sur le nuage de points peuvent ensuite être exportés ou envoyés instantanément sur AutoCAD.

L'exercice suivant est un exemple de récolement 2D effectué à partir d'un nuage de point. L'ouvrage qui fait l'objet d'étude est une partie du boulevard périphérique de Paris. N'ayant pas de plan de la zone, un scan avait été réalisé et cela a permis de mettre en œuvre cette exploitation du nuage de points orienté au récolement 2D.

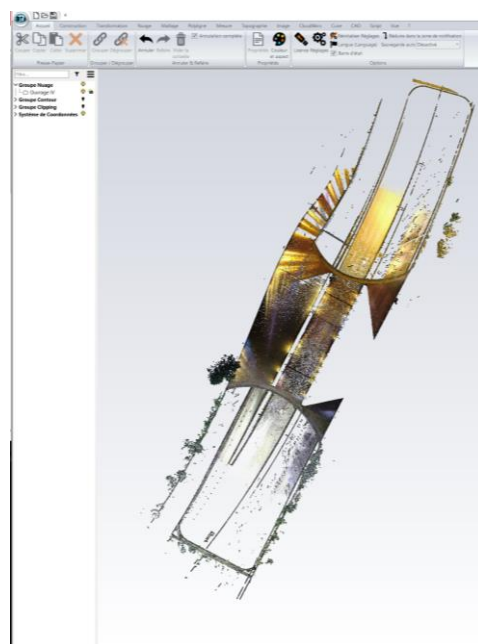
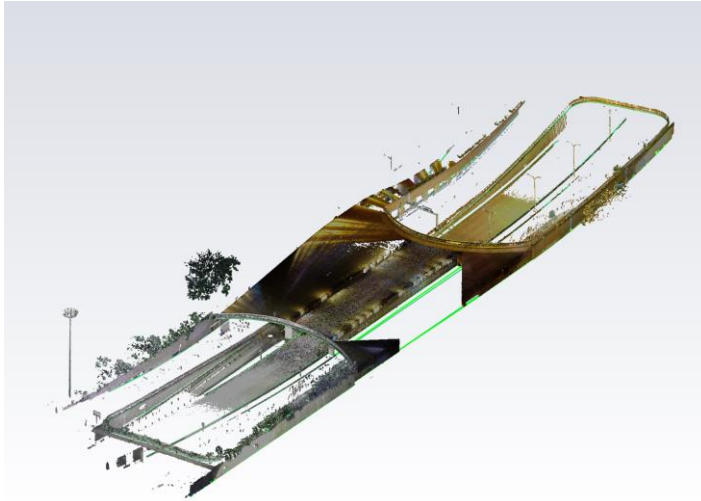


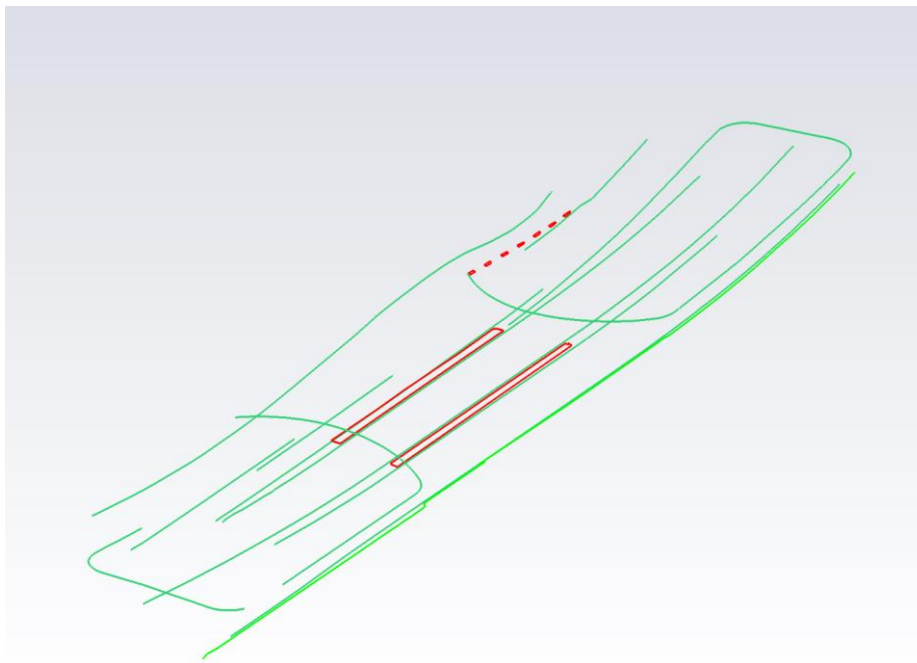
Figure 110. Nuage de points de l'ouvrage IV.

Les limites de la voirie (*lignes vertes*) ainsi que certains éléments de structures seront calqués à partir du nuage de points.



**Figure 111. Nuage de point de l'ouvrage IV et polygones dessinés à partir du nuage.**

Ainsi le résultat final du récolement, se présente de la manière suivante



**Figure 112. Polygones extraites à partir du nuage de point de l'ouvrage IV.**

Ce même résultat géoréférencé sera ensuite exporté sur AutoCAD pour des possibles modifications ou son impression sur papier.

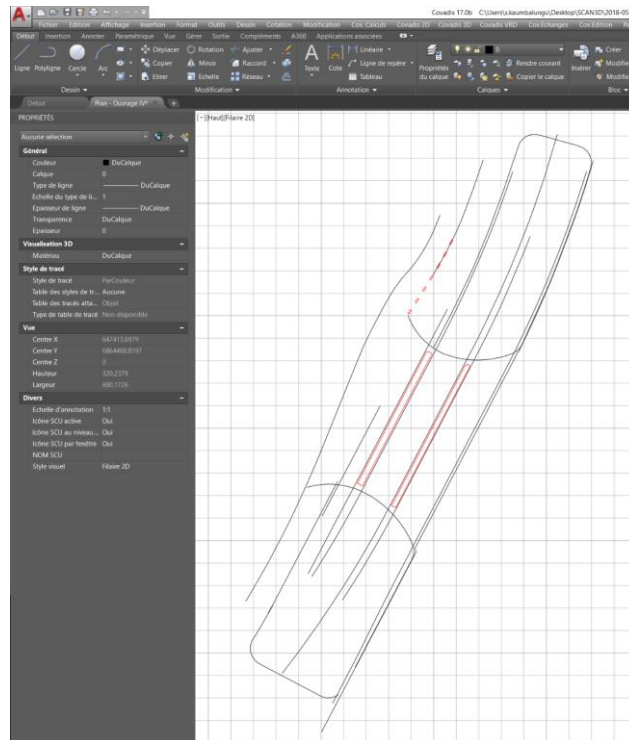


Figure 113. Importation des polygones sur AutoCAD.

Pour clore les analyses effectuées sur 3D RESHAPER, la liste des points forts et faibles est ainsi présentée

#### AVANTAGES

- Lors de l'importation du nuage de points le logiciel propose de réduire la densité de points pour une meilleure manipulation des données.
- Les analyses sur le nuage de points se font avec rapidité.
- Possibilité de comparer des profils. Cette option est très utile dans le cas des tunnels.
- La manipulation des rapports est simple et offre plusieurs options de présentation.

Les dessins effectués sur le nuage de points peuvent être directement envoyés sur AutoCAD.

#### INCONVENIENTS

- Les modèles 3D s'importent sous formes de plusieurs facettes, il est donc nécessaire de regrouper les faces selon leur position (Intrados ou Extrados).

- La création des profils à partir d'un modèle CAO et un axe pose problème. Une solution parallèle est la création des sections planaires du modèle CAO.
- Les opérations d'assemblage des scans bruts ne sont pas fluides, le logiciel importe chaque scan dans un repère différent.

#### 4.4. COMPARAISON DES RESULTATS D'ANALYSE

Les logiciels identifiés pour les différentes opérations d'analyse seront comparés entre eux sur différents niveaux afin de mieux identifier les capacités de chacun. Pour cela, un tableau comparatif (*voir annexe 2*) sur les formats de fichier et les fonctionnalités des logiciels a été établi.

Ce tableau fut complété au fur et à mesure que les tests sur un logiciel étaient finis et il a contribué dans la mise en place de la procédure d'analyse de scan 3D.

Un autre niveau de comparaison entre les logiciels sera sur leur précision d'analyse. A ce sujet, les résultats obtenus avec chaque logiciel seront comparés entre eux afin de détecter les failles de calculs.

---

##### 4.4.1. PRECISION D'ANALYSE DES LOGICIELS

Pour examiner la précision d'analyse comparative entre le modèle 3D et le nuage de point, nous nous baserons sur les résultats d'analyses des logiciels AS-BUILT, BUILDIT et 3D RESHAPER étant donné que le même ouvrage a fait objet d'étude sur ces trois logiciels.

Une première observation sur la superposition du nuage sur le modèle 3D sera la base de l'étude de précision.

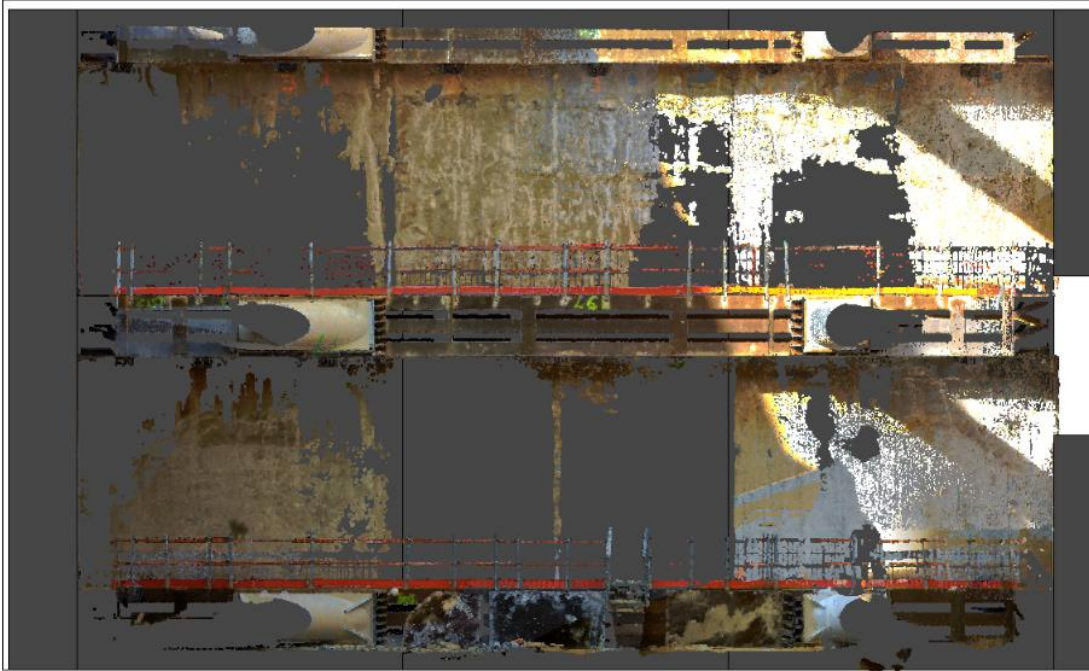


Figure 114. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans REVIT.

La superposition du nuage de point sur le modèle 3D dans BUILDIT se présente de la manière suivante.

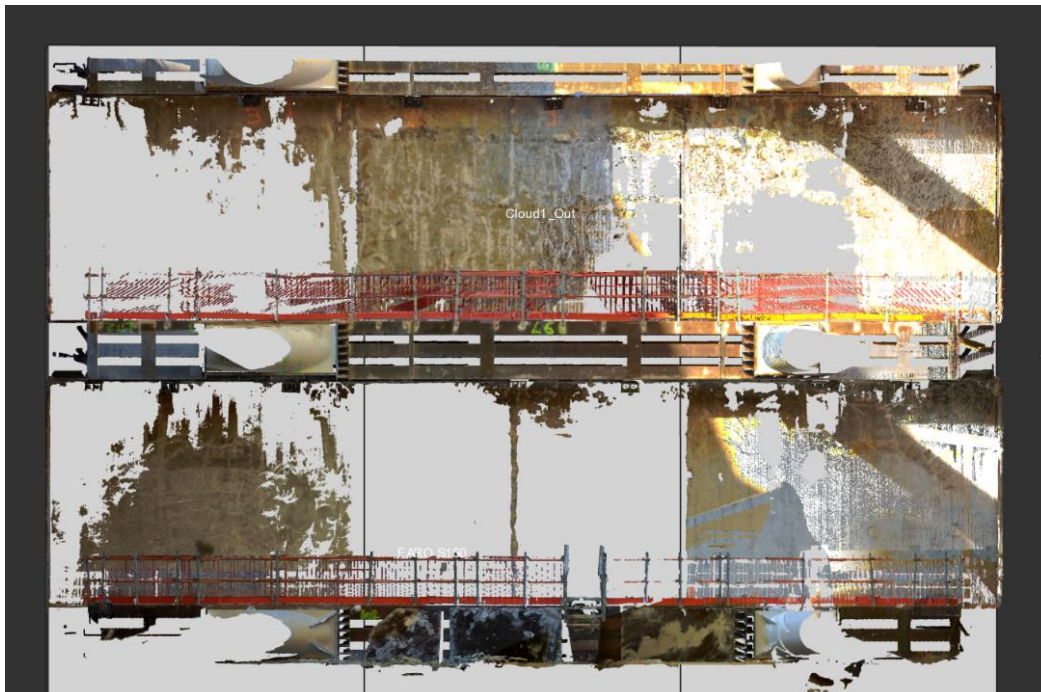


Figure 115. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans BUILDIT.

Et enfin sur 3D RESHAPER, nous avons la visualisation suivante



Figure 116. Vue en élévation du nuage de points superposé sur la coupe A-A dans 3DR.

Sur les trois images nous retrouvons les mêmes zones visibles et invisibles, cela montre que la donnée d'entrée de base pour le calcul est la même sur les trois logiciels.

L'analyse a été configurée avec un maximum de  $20\text{ cm}$  pour le calcul, c'est-à-dire, nous voulons que le logiciel affiche les distances *nuage de points/modèle 3D* comprises entre  $-20\text{ cm}$  et  $20\text{ cm}$  et au-delà de cette marge aucun calcul ne doit s'effectuer.

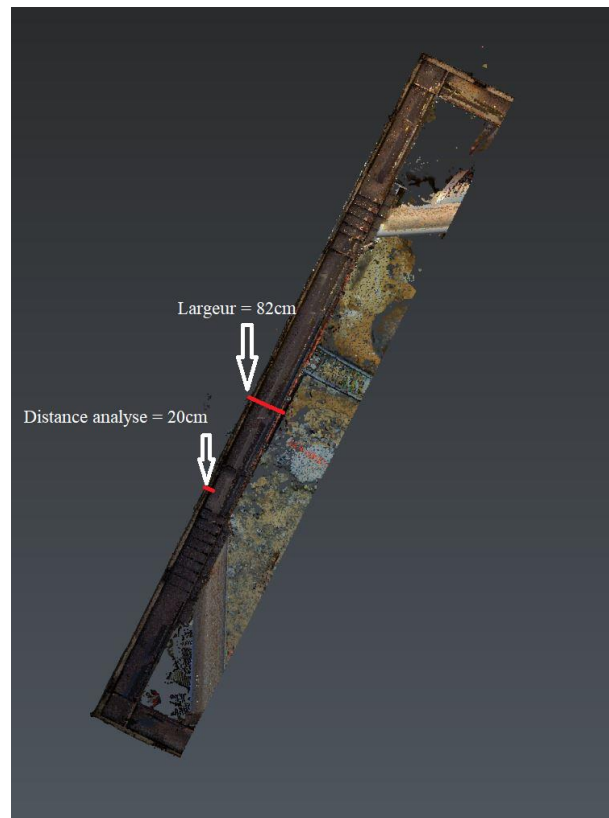


Figure 117. Vue en plan des distances lierne-paroi moulée et distance d'analyse.

Et maintenant après configuration des paramètres de calcul, on lance le calcul et on obtient les résultats suivants.

### AS-BUILT

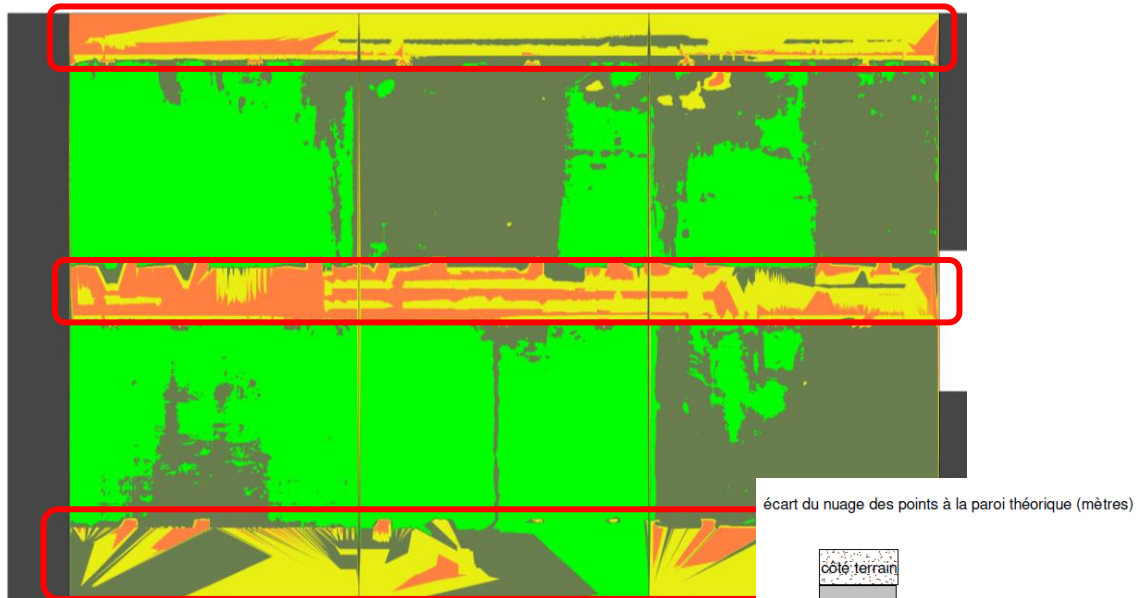


Figure 118. Résultat d'analyse AS-BUILT avec 20cm de tolérance de calcul.

En analysant les résultats d'AS-BUILT, nous remarquons qu'il trouve des valeurs entre 0 cm et 20 cm au niveau des liernes (encerclées en rouge sur l'image), pourtant les liernes se trouvent à ~82 cm (figure 117) de la paroi moulée.

Si l'on configure l'analyse pour un calcul de 15cm de tolérance on obtient le résultat suivant.

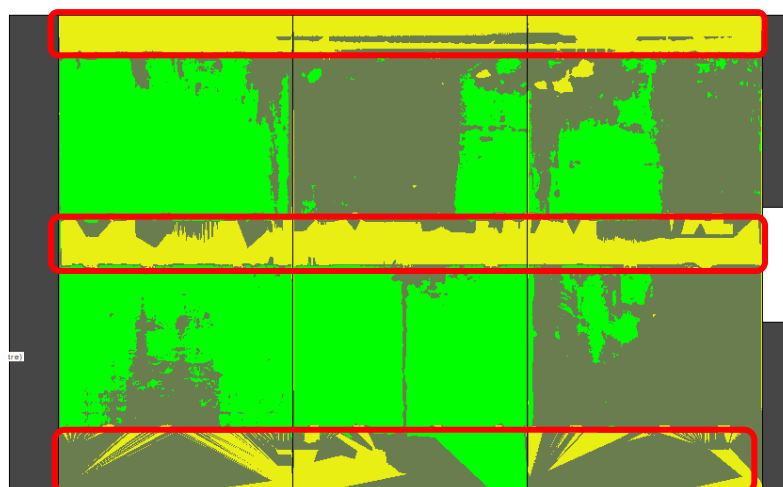


Figure 119. Résultat d'analyse AS-BUILT avec 15cm de tolérance de calcul.

AS-BUILT trouve cette fois-ci des résultats différents sur les liernes. Les zones qui, avant avaient des valeurs supérieures à *15 cm*, ont maintenant des valeurs comprises entre *10 cm* et *15 cm*. Un affichage correct du résultat serait de griser les zones avec les valeurs supérieures à la tolérance de calcul comme nous verrons sur les résultats d'analyse des autres logiciels.

La conclusion tirée est qu'AS-BUILT extrapole le résultat de ses calculs, il n'arrive pas à seulement afficher la zone désirée car son algorithme de calcul le lui empêche et par conséquent il colorie la totalité du modèle 3D.

Graphiquement, le résultat d'analyse d'AS-BUILT serait représenté de la manière suivante

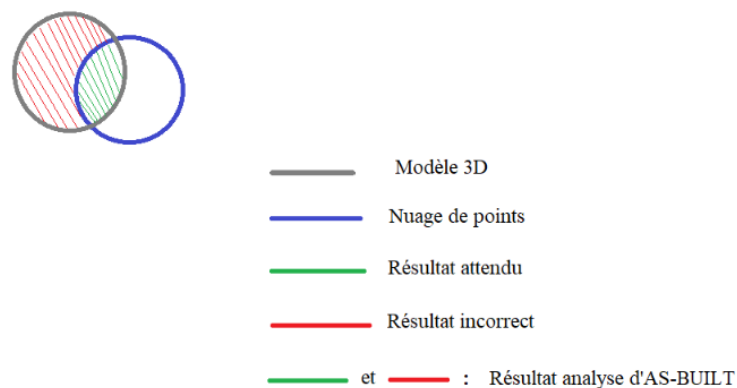


Figure 120. Graphique du résultat d'analyse d'AS-BUILT.

Ces résultats rendent peu précis et fiable son analyse, car en diminuant la tolérance de calcul on arriverait à trouver des valeurs différentes même sur la paroi moulée.



## BUILDIT

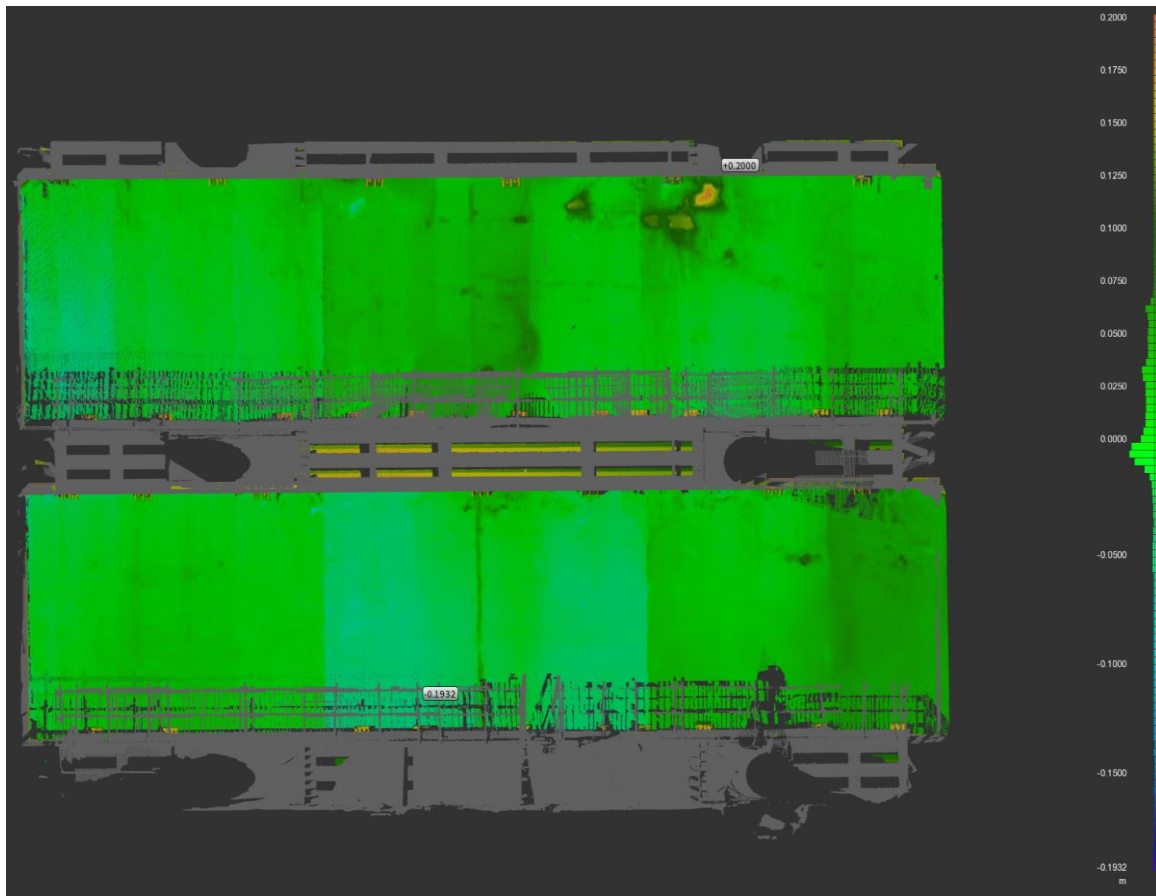


Figure 121. Résultat d'analyse de BUILDIT.

BUILDIT quant à lui trouve des résultats qui ne sont pas très détaillés contrairement à AS-BUILT. Cela est dû à son style d'affichage de résultat en mode dégradé (figure 83). Son résultat n'est pas tout à fait le genre de rendu qui satisferait à nos besoins sur le chantier. Son analyse aurait un impact différent s'il permettait d'afficher le résultat par plages des couleurs, mais dans ce cas il n'est pas assez précis car on ne peut pas identifier correctement les limites de changement de couleurs et cela influencera sur la détection des zones creuses ou bossues de la paroi moulée.

Par contre, BUILDIT arrive à respecter la tolérance de calcul figée et n'attribue pas l'une des couleurs déterminée sur l'échelle aux zones hors tolérances (couleur grise), ce qui n'est pas le cas d'AS-BUILT.

### 3D RESHAPER

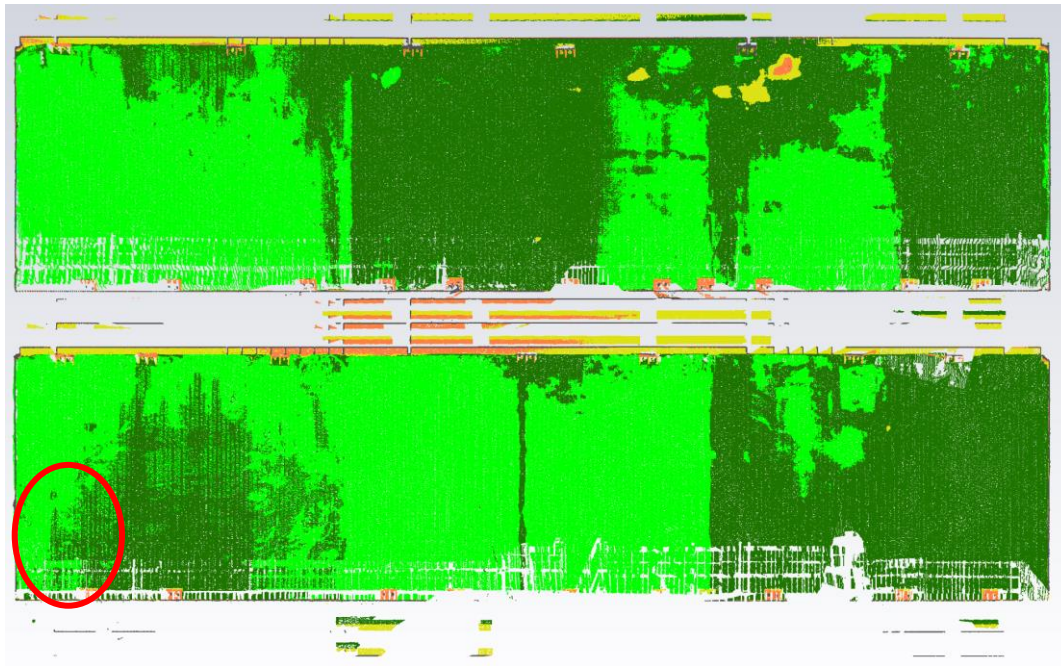


Figure 122. Résultat d'analyse de 3DR.

Le résultat trouvé par 3D RESHAPER est similaire à celui d'AS-BUILT au niveau de du calcul, et en affichage par rapport aux zones hors tolérance, il se rapproche de BUILDIT.

Il détecte également sur une zone (encadrée en rouge sur l'image) de la paroi moulée un peu plus de valeurs qu'AS-BUILT, cela est dû à son niveau de détail qui est plus élevé qu'AS-BUILT.

En ce qui concerne l'analyse des profils, les deux résultats qui seront comparés sont ceux des logiciels AMBERG TUNNEL et 3D RESHAPER.



Les deux logiciels trouvent pratiquement le même résultat. L'analyse des profils se réalise correctement sur les deux logiciels et cela implique que peu importe le logiciel utilisé, le résultat sera fiable.

---

#### 4.4.2. CONCLUSION SUR L'UTILISATION DES LOGICIELS

Les objectifs de départ mis en place pour les études d'analyse sur les différents logiciels, visaient de manière globale à trouver le(s) logiciel(s) capable(s) d'exécuter correctement les différentes opérations de post-traitement d'un nuage de points. Ces opérations sont l'assemblage, l'analyse et la modélisation.

Après études sur les fonctionnalités, les méthodes de calcul ainsi que les précisions du calcul d'analyse des logiciels, nous remarquons que certains d'entre eux n'ont pas donné des réponses satisfaisantes aux attentes du chantier.

De ce fait, les logiciels qui n'ont pas répondu positivement aux besoins du chantier EOLE ont été mis de côté pour donner naissance à la suivante procédure pour les opérations de post-traitement d'un nuage de point.

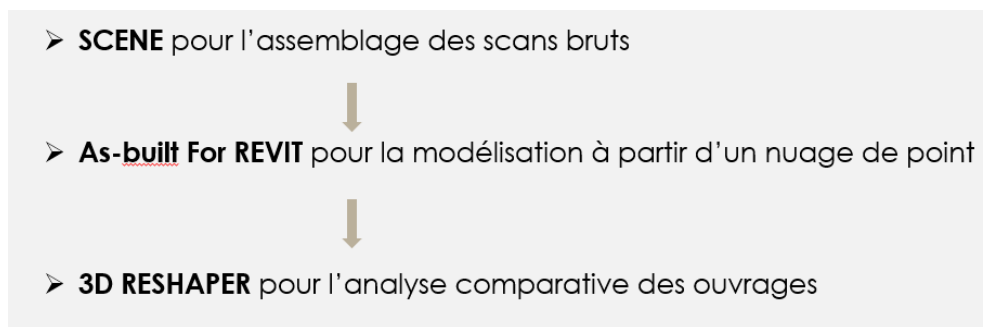


Figure 125. Etapes pour le post-traitement des nuages de points.

## 5. LA TOPOGRAPHIE EN TUNNEL

Les interventions topographiques effectuées sur le chantier EOLE sont programmées par rapport aux DTT. Les interventions relatives aux DTT sont en général des implantations ou des relevés topographiques.

Cependant nous nous trouvons dans un chantier qui consiste à prolonger une ligne ferroviaire souterraine, de là apparaissent les opérations de guidage du tunnelier et changement de station.

L'apport de l'ingénieur topographe dans ces opérations est crucial, car il assure que le tunnelier termine son creusement avec bonne précision.

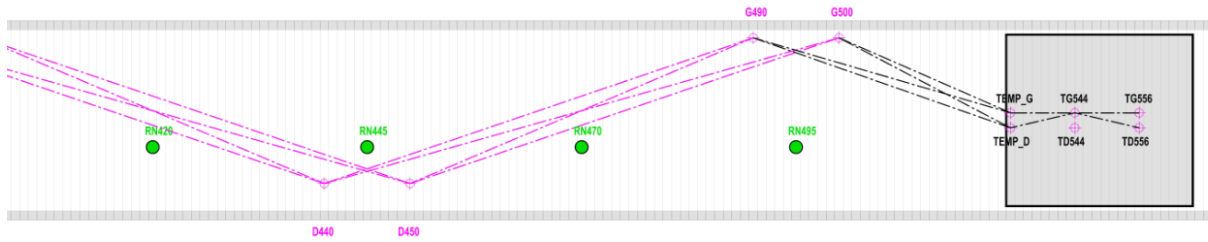
Dans le cadre de mon stage, j'ai eu à participer à une opération de changement de station qui s'effectue en réalisant une polygonale secondaire de tunnel.

### **POLYGONALE SECONDAIRE DE TUNNEL (OU POLYGONALE DU SYSTEME DE GUIDAGE – I.E. PYXIS**

Il s'agit de la polygonale temporaire, réalisé au-dessus des remorques du tunnelier, permettant de connecter le système de guidage Pyxis à la polygonale principale.

Elle est effectuée au-dessus des remorques du tunnelier et permet au théodolite de Pyxis d'être déterminé en XYZ et orientation. Il s'agit d'une polygonale temporaire dans le sens où les consoles sont installées et désinstallées au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier et de ses remorques.

La dernière console de la polygonale principale est stationnée afin de permettre les mesures sur la console arrière de la polygonale secondaire. Les coordonnées des consoles du système sont ainsi déterminées. Ces dernières sont entrées dans l'interface du système de guidage au moment des déplacements de la station totale Pyxis.



**Figure 126. Cheminement polygonale secondaire.**

Sur chaque console sont installés successivement station totale et prisme sur monteur. Toutes les visées réalisables entre deux consoles successives sont mesurées (angles horizontaux et verticaux, distances inclinées).

A chaque mise en station, un tour d’horizon est réalisé. Il est composé de 1 paire de séquences à minima.

Les consoles de la polygonale secondaire sont différentes de celles de la principale. Elles sont doubles permettant la mise en place d’une station totale ou d’un prisme sur monteur en parallèle du théodolite de guidage et de sa référence afin de réaliser le déplacement de la station sans interrompre le creusement.



**Figure 127. Console double pour la polygonale secondaire.**

## 6. CONCLUSION

Ce stage a eu un impact au niveau personnel très constructif. A partir des hypothèses établies avant la réalisation de toutes ces études, les objectifs à atteindre devenaient plus clairs. Du coup, la planification d'attaque sur le sujet était plus facile.

Ce sujet qui englobe les différentes exploitations des nuages de points dans un chantier de prolongement de ligne de RER, m'a permis de découvrir des nouvelles applications du scan 3D telles que les analyses comparatives modèle 3D vs nuage de points et la modélisation à partir d'un nuage de points, et m'a aussi permis de développer des nouvelles habiletés au niveau des logiciels d'exploitation des nuages de points et sur l'organisation du travail.

Traiter et diffuser des nuages de points est un vaste sujet, non seulement pour le temps de traitement mais aussi pour les étapes d'assemblage/géoréférencement et nettoyage du nuage de points. Le nettoyage du nuage de points est directement lié à l'un des avantages du scan 3D, celui de mesurer tout ce qui est visible. Par conséquent, le nuage de points aura de la valeur que si l'information qu'il contient est exploitable et cela implique l'élimination des objets considérés comme bruit ou inutiles.

D'autre part, l'interopérabilité des formats des fichiers reste un problème à résoudre car le fait de travailler avec plusieurs logiciels implique avoir un format de fichier standard et lu sur tous les logiciels sans perte d'information.

Les études menées pendant ce stage apporteront au chantier EOLE une procédure d'exploitation des nuages de points allant d'une campagne de scan 3D sur terrain à l'exportation d'un livrable après post-traitement.

Ce travail met en valeur une nouvelle méthode d'acquisition des données et fait comprendre que la quantité d'information que contient un nuage de points 3D surpasse celle d'un plan topographique. Cela emmène à adapter la technique au besoin.

Finalement, l'explosion des ventes d'instruments (laser scanner) montre que la lasergrammétrie est une science en forte croissance en ce moment et ses domaines d'applications sont variés. Un autre problème qui restera encore à régler est le volume de données qui atteint assez vite le Giga-octets.

## CONCLUSION (ANGLAIS)

This internship had a very constructive personal impact. Based on the assumptions established before all these studies were carried out, the objectives to be achieved became clearer. As a result, planning an attack on the subject was easier.

This subject, which includes the different exploitations of point clouds in an REN line extension project, allowed me to discover new 3D scanning applications such as comparative analyses 3D model vs point cloud and modeling from a point cloud, and also allowed me to develop new skills in point cloud exploitation software and work organization.

Processing and distributing point clouds is a vast subject, not only for the processing time but also for the assembly/geo-referencing and cleaning steps of the point cloud. Cleaning the point cloud is directly related to one of the advantages of 3D scanning, that of measuring everything that is visible. Therefore, the point cloud will only be valuable if the information it contains is usable and this implies the elimination of objects considered as noise or useless.

On the other hand, the interoperability of file formats remains a problem to be solved because working with multiple software requires having a standard file format that is read on all software without loss of information.

The studies carried out during this internship will provide the EOLE site a procedure for exploiting point clouds, ranging from a 3D scanning campaign on field to the export of a deliverable after post-processing.

This work highlights a new method of data acquisition and makes it clear that the amount of information contained in a 3D point cloud exceeds that of a survey plan. This leads to adapting the technique as needed.

Finally, the explosion in sales of instruments (laser scanners) shows that lasergrammetry is a fast-growing science at the moment and its fields of application are varied. Another problem that remains to be solved is the volume of data that reaches the Gigabyte relatively quickly.



## 7. BIBLIOGRAPHIE

Janina Zaczek – Peplinska & Maria Elzbieta. Comparison of point clouds captured with terrestrial laser scanners with different technical characteristic.

Mounir Ait Mansour (2015). Extraction d'éléments géométriques dans un nuage de points LiDAR terrestre

Hexagon (2018). 3D Reshaper Beginner's Guide.

Amberg technologies (2019). User manual.

Faro (2019). Scene' user guide.

Buildit construction (2018). User manual

Polyworks metrology (2018). Beginner's Guide.

## 8. ANNEXES