



HAL
open science

Réalisation d'une visite virtuelle couplée avec un SIG3D et intégrant des données de capteurs pour le suivi d'ouvrage d'art

N'Depo Jardel Norgil Atse

► To cite this version:

N'Depo Jardel Norgil Atse. Réalisation d'une visite virtuelle couplée avec un SIG3D et intégrant des données de capteurs pour le suivi d'ouvrage d'art. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04780534

HAL Id: dumas-04780534

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04780534v1>

Submitted on 13 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

N'depo Jardel Norgil ATSE

Réalisation d'une visite virtuelle couplée avec un SIG3D et intégrant des
données de capteurs pour le suivi d'ouvrage d'art

Soutenu le 03 septembre 2024

JURY

Monsieur Christophe CHARLET	Président du jury
Monsieur Thibault COLETTE	Maître de stage
Monsieur Mouaad BOUMESHAL	Maître de stage
Monsieur Maxime TATIN	Maître de stage
Monsieur Jean-Michel FOLLIN	Enseignant référent

Remerciements

Nous ne pouvons débuter la rédaction de ce mémoire sans utiliser l'encre de notre plume pour exprimer notre reconnaissance envers ceux qui ont rendu ce stage de fin d'études possible et agréable.

De par ces propos, nous remercions de vive voix ces personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de ce stage.

Nous tenons à remercier Mr Thibault COLETTE qui a cru en nous pendant le processus de recrutement en nous offrant cette belle opportunité de travailler au sein de Socotec Monitoring France. Nous le remercions pour sa disponibilité, son expertise, sa pédagogie et sa patience.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mr Mouaad BOUMESHAL pour sa disponibilité pendant la rédaction de ce mémoire, ses conseils qui nous ont permis de mieux travailler, ses critiques et observations qui ont été utiles au cours de notre stage.

Nous remercions aussi, cette belle famille, cette entreprise qui nous a accueillie dans son local pour notre stage de fin d'études.

Nous tenons également à remercier notre professeur référent Mr Jean-Michel FOLLIN pour sa disponibilité, sa patience, son suivi, son attention son esprit critique et pour son soutien tout au long de ce stage de fin d'études et pendant la rédaction de ce mémoire.

A toutes ces personnes qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce stage, nous ne cesserons de vous être reconnaissant.

A nos parents et à notre famille qui n'ont jamais cessé de croire en nous, merci infiniment.

Liste des abréviations

2D : 2 Dimensions

3D : 3 Dimensions

API : Application Programming Interface

ARN : Agence de Recherche National

BIM : Building Information Model

CC : Conique Conforme

CSS : Cascading Style Sheets

HD : High Definition

HTML : HyperText Markup Language

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

JS : JavaScript

MNE : Modèle Numérique d'Elévation

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PFI : Projet France International

RER : Réseau Express Régional

RGB : Red Green Blue

RGF : Réseau Géodésique Français

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SMF : Socotec Monitoring France

WebGL : Web Graphics Library

WFS : Web Features Services

WMS : Web Map services

WMTS : Web Map Tiles Services

Glossaire

Framework : un ensemble cohérent de composants logiciels structurels qui sert à créer les fondations ainsi que les grandes lignes de tout ou partie d'un logiciel, c'est-à-dire une architecture. [Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Framework>]

Entonnement : Une construction destinée à relier plusieurs tunnels. [Source : <https://www.lalanguefrancaise.com>]

Photo HD : Il désigne une classification de contenus (images, vidéo) et d'équipements de diffusion ayant une définition d'au moins 1280 par 720 pixels (720p). Elle est l'évolution du format SD (définition standard). [Source : <https://www.Wikipédia.com>]

SIG : Système d'Information Géographique, c'est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. [Source : <https://www.Wikipédia.com>]

Tuiles : Une tuile est une image carrée qui représente une petite partie d'un fond de carte. L'assemblage de plusieurs tuiles juxtaposées permet de voir un fond de carte complet. [Source : <https://www.visorando.com>]

Serveur web : Un serveur web est soit un logiciel de service de ressources web (serveur HTTP), soit un serveur informatique (ordinateur) qui répond à des requêtes du World Wide Web sur un réseau public (Internet) ou privé (intranet) en utilisant principalement le protocole http [source : <https://www.wikipedia.com>]

Table des matières

Introduction	7
I CONTEXTE DE L'ETUDE	9
I.1 INSTRUMENTATION DISPONIBLE A SOCOTEC MONITORING FRANCE.....	9
I.1.1 Les capteurs	9
I.1.2 La plateforme de visualisation de données Datatys	10
I.2 CAHIER DES CHARGES	10
I.2.1 Prolongement de la ligne du RER E	10
I.2.1.1 Projet Eole.....	10
I.2.1.2 Projet d'entonnement Haussmann Saint Lazare	11
I.2.2 Besoins du client.....	12
I.2.3 Proposition de SOCOTEC et acquisition des données.....	12
I.2.3.1 Proposition de SOCOTEC.....	12
I.2.3.2 Acquisition de données	13
I.3 ETAT DE L'ART	15
I.3.1 MARZIPANO : UN OUTIL OPEN SOURCE POUR LA VISITE VIRTUELLE.....	15
I.3.1.1 Généralités sur Marzipano.....	15
I.3.1.2 Format de données	16
I.3.1.3 Mode de fonctionnement.....	16
I.3.2 THREE JS.....	17
I.3.3 GEOREFERENCMENT	17
I.3.4 DONNEES SPATIALES 3D : LES NUAGES DE POINTS.....	18
I.3.5 Itowns, une librairie de SIG en ligne	19
I.3.5.1 Introduction à Itowns	19
I.3.5.2 Quelques caractéristiques de Itowns	20
II REALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE ET DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL POUR L'INTEGRATION DE CAPTEURS	21
II.1 ETAPES DE LA REALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE	21
II.2 PERSONNALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE.....	22
II.2.1 Intégration des images HD dans la visite virtuelle.....	22
II.2.2 Problème lié à l'intégration des images HD et proposition de solution	23
II.2.3 Mise en place d'une application open source pour effectuer le zoom sur les images HD ..	24
II.3 DEVELOPEMENT D'OUTIL POUR L'INTEGRATION DE CAPTEURS	25
II.3.1 Le rôle de l'outil	25
II.3.2 Mise en place de l'interface utilisateur de l'outil.....	26
II.3.3 Intérêt de l'outil	27
III TRAITEMENT DES DONNEES ET PROCEDURE DE MISE EN PLACE D'UN SIG 3D	28
III.1 TRAITEMENT DES DONNEES	28
III.1.1 Nettoyage des nuages de points	28
III.1.2 Produits 2D : Coupes et déroulés	29
III.1.2.1 Les coupes : transversales et longitudinales	29
III.1.2.2 Les déroules ou plans développés	30
III.2 PROCEDURE DE MISE EN PLACE DU SIG 3D : ITOWNS.....	31
III.2.1 Installation du package d'itowns.....	31
III.2.2 Contenu du dossier utilisé	31
III.2.3 Configuration de l'interface utilisateur	32
III.2.3.1 Mise en place du « view ».....	32
III.2.3.2 Intégration des couches	32

III.3	INTEGRATION DU NUAGE DE POINTS	33
III.3.1	Types et formats de données	33
III.3.2	Processus d'intégration	33
III.3.2.1	Géoréférencement	33
III.3.2.2	Procédure de géoréférencement	34
III.3.2.3	Conversion des nuages de points en potree	35
III.3.2.4	Résultat et Affichage des données.....	36
III.4	INTEGRATION DE LA VISITE VIRTUELLE.....	37
III.4.1	Matérialisation des Scans.....	37
III.4.2	Lien entre les cercles 3D dans le SIG 3D et les scans de la visite virtuelle extérieure...	37
	Conclusion.....	39
	Bibliographie	41
	Liste des Figures.....	45
	Liste des tableaux	45

Introduction

La question de la visualisation de données a toujours été un challenge au cœur de notre société. Visualiser les données permet de les interpréter et de les comprendre c'est-à-dire d'éclaircir les informations complexes et condensées [Andry,2021]. Ainsi, « visualiser les données, c'est les transcrire sous forme visuelle à des fins de compréhension et de communication » [Andry, et al., 2022].

Aujourd'hui, on constate une place prépondérante et grandissante de la visualisation de données dans notre société avec le progrès de la technologie. En effet, grâce à l'évolution de la technologie, nous avons la possibilité d'acquérir une quantité importante de données. Il est donc nécessaire de les visualiser à travers de puissants outils informatiques comme des frameworks prenant en compte la 3D. Nous pouvons citer par exemple : les visites virtuelles, les réalités virtuelles, les SIG3D comme par exemple Cesium et Itowns. Il n'est plus seulement question de les visualiser, mais aussi de les conserver, de maintenir leur accessibilité, de pouvoir interagir avec notre visuel et d'y ajouter certaines fonctionnalités afin que le rendu soit adapté. Elle est privilégiée pour l'interaction entre les utilisateurs et l'information.

SOCOTEC Monitoring (SMF), une filiale du groupe SOCOTEC est une entreprise française exerçant dans le monitoring d'ouvrages, c'est-à-dire l'auscultation et le suivi des ouvrages d'art (tunnels, ponts, ports, voies ferrées, canaux, barrages...). Elle intervient également dans l'instrumentation, l'exploitation et la maintenance des constructions. Dans le cadre de la plupart de ses projets, notamment celui de l'entonnement¹ Haussmann Saint Lazare, elle doit réaliser le suivi d'un tunnel par le biais de ses appareils, notamment le scanner 3D RTC360, les stations totales et les capteurs. L'ouvrage est équipé de capteurs pouvant mesurer certaines grandeurs afin de suivre les déplacements et déformations de l'ouvrage durant sa durée de vie. Plusieurs capteurs peuvent être utilisés, par exemple, les fissuromètres, les capteurs GNSS, l'inclinomètre... Plusieurs données sont acquises et stockées par ces capteurs à travers des coffrets d'acquisition. Ces données sont transférées sur la plateforme de visualisation 2D appelée Datatys pour permettre aux clients de suivre leurs projets. Ce type de visualisation est souvent inadapté pour certains projets. À la

¹ Le tunnel dit d'entonnement est une galerie souterraine qui assure l'interconnexion des tunnels

demande de la plupart de ses clients, l'entreprise souhaite mettre en place d'une plateforme servant à visualiser l'environnement tridimensionnel grâce aux images panoramiques et aux nuages de points issus du scanner. Cette Visualisation leur permettra de prendre des décisions pour l'avancement de leurs projets.

L'objectif visé par ce TFE est de mettre en place des outils servant à visualiser les données issues du scanner dans un environnement tridimensionnel et de répondre aux besoins d'un client par le biais d'un livrable (visite virtuelle, nuage de points nettoyé, coupes longitudinales et transversales et des vues déroulées du nuage de points). De manière plus explicite, nous serons chargés de réaliser une visite virtuelle à partir de photographies issues de relevés scanner. Une fois les données des capteurs à notre disposition, nous serons également amenés à développer un outil pouvant matérialiser et intégrer ces données dans la visite virtuelle. Cette visite virtuelle doit être par la suite intégrée dans un SIG (Système d'Information Géographique) 3D (3 dimensions) développé en amont. Nous serons également chargé du traitement des différents nuages de points afin de constituer le livrable. Les différents outils qui seront réalisés s'appuieront sur des outils open source dans le but d'avoir un accès facile aux codes sources et d'éventuelles améliorations des outils.

La problématique liée à ce mémoire s'articule autour de cette question :

Comment les outils open sources de visualisation 3D comme Marzipano et Itowns peuvent-ils contribuer au suivi d'ouvrage d'art ? Afin de mieux appréhender notre problématique, nous la subdivisons en plusieurs questions : Comment réaliser et personnaliser une visite virtuelle grâce à Marzipano ? Par quel moyen pouvons-nous enrichir de capteurs la visite virtuelle pour le suivi d'ouvrage ? Comment mettre en place un SIG 3D pouvant favoriser l'intégration de la visite virtuelle ?

Dans la suite de notre mémoire, nous présenterons d'abord le contexte de l'étude. Nous procéderons également à un état de l'art sur la visite virtuelle et sur le SIG3D qui sera mis en place. Ensuite, nous entamerons la procédure de réalisation de la visite virtuelle et les différentes modifications apportées dans l'optique de la personnalisation. Puis nous verrons les étapes de la mise en place de l'outil permettant d'intégrer les capteurs sur notre visite virtuelle. Enfin, nous aborderons la procédure de mise en place de notre SIG 3D, le traitement des nuages de points et les différents moyens mis en place pour intégrer la visite virtuelle dans le SIG 3D.

I CONTEXTE DE L'ETUDE

I.1 INSTRUMENTATION DISPONIBLE A Socotec Monitoring France

Le but de cette partie est de mettre en lumière les outils de travail de SOCOTEC monitoring (SMF) et l'enjeu de mettre en place des plateformes de visualisation d'un environnement tridimensionnel.

I.1.1 Les capteurs

Comme mentionné dans l'introduction, les capteurs sont des outils indispensables dans la réalisation des projets de Socotec monitoring. Le choix d'un capteur dépend de l'aspect de l'ouvrage à surveiller. Les capteurs de Socotec monitoring sont classés par type d'auscultation. Les lignes suivantes présenteront ses capteurs.

- Les capteurs d'auscultation structurelle ;

Utilisés pour le monitoring de la structure d'un ouvrage. Ils mesurent la variation ou le mouvement structurel de l'ouvrage.

- ❖ Le tilt log : Utilisé pour la mesure de l'inclinaison (Figure 1) ;
 - ❖ Le Corrovolta : Utilisé pour la détection et la mesure de corrosion dans le béton armé.
- Capteurs d'auscultation environnementale.

Utilisés pour mesurer l'effet qu'ont les travaux sur l'environnement

- ❖ Le piézomètre : Utilisé pour la mesure la profondeur du niveau d'eau (Figure 2) ;
- ❖ Airlog outdoor : Mesure la qualité de l'air extérieur (Figure 3).

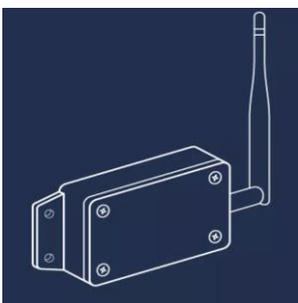


Figure 1 : Tilt log [Source : Socotec Monitoring]



Figure 2 : Piézomètre [Source : Socotec Monitoring]



Figure 3 : Airlog outdoor [Source :Socotec Monitoring]

I.1.2 La plateforme de visualisation de données Datatys

A l'ère du Big Data, nous assistons à une augmentation de données. Pour être utile, ces données doivent être accessibles et intelligibles, afin de déclencher une action de prévention ou de maintenance. C'est ainsi que SOCOTEC met en place Datatys, une application web dont le but est de faciliter la surveillance des ouvrages. En effet, Datatys gère la collecte, le traitement et la visualisation 2D des données issues des différents capteurs utilisés lors des projets. A chaque mesure réalisée, les données sont automatiquement transférées à travers les coffrets d'acquisition et « Datatys » se charge d'afficher en temps réel les données selon les 3 différents axes à travers un graphique. Des seuils de sécurité présentés sous formes de codes couleur, sont définis entre le client et le manager du projet. Les alertes en cas de franchissement de seuils définis sont configurées pour déclencher l'envoi d'un mail ou d'un SMS [Socotec,2024].



Figure 4 : Graphe de déplacements suivant les directions X, Y et Z et présence des seuils de sécurité (en rouge) sur Datatys [Source : Datatys]

I.2 CAHIER DES CHARGES

I.2.1 Prolongement de la ligne du RER E

I.2.1.1 Projet Eole

Le projet Eole, communément appelé projet de prolongement du RER E est l'un des grands projets pour la mobilité en île de France qui vise à desservir l'agglomération parisienne suivant l'axe est-ouest.

Grace au projet Eole, le RER E n'aura plus pour unique destination Chelle et Tournan, cette ligne sera étendue jusqu'à Nanterre-la-Folie puis à Mantes-la-Jolie.

De manière plus explicite, la ligne du RER E sera prolongée de 55 kilomètres (km) vers l'ouest entre la gare Hausmann saint-Lazare et Mantes-la-Jolie. Cette extension comportera:

- ❖ La création d'un tunnel de 8km entre la gare de Hausmann Saint-Lazare et Nanterre ;
- ❖ La création de nouvelles gares², Porte Maillo, La Défense-CNIT, Nanterre-la-Folie
- ❖ La rénovation de 47 km de voies existantes : De la ligne J5 Mantes-la-Jolie à Hausmann Saint-Lazare.

Plusieurs acteurs ont contribué à la réalisation de ce projet à savoir : L'Etat, la Région, la société du grand Paris, Conseils départementaux des Yvelines et des Hauts-de-Seine, la ville de Paris, SNCF Réseau et IDF Mobilités.

I.2.1.2 Projet d'entonnement Hausmann Saint Lazare

Le projet entonnement Hausmann Saint-Lazare est la composante principale du projet Eole (I.2.1.1) qui consiste à construire un tunnel de 8km entre Hausmann Saint-Lazare et Nanterre la Folie. Ce tunnel doit être joint aux infrastructures déjà existantes. Quelques défauts surviennent après la réalisation de l'ouvrage.

D'après le communiqué de presse en Chelles 2019, la construction des voies ferrées, la fourniture et mise en place des équipements ont été attribuées par la SNCF maître d'ouvrage du projet à TSO (mandataire) en groupement avec EIFFAGE RAIL, TSO CATENAIRES et SAGES RAIL.

Dans le cadre de l'auscultation de l'ouvrage, des voies existantes étant donné la construction de nouvelles voies, TSO, une filiale de NGE fait donc appel à SOCOTEC monitoring (sous-traitant) spécialiste dans le monitoring.

² Les deux premières seront des gares souterraines desservies par le tunnel et la dernière sera positionnée à la sortie du tunnel ;

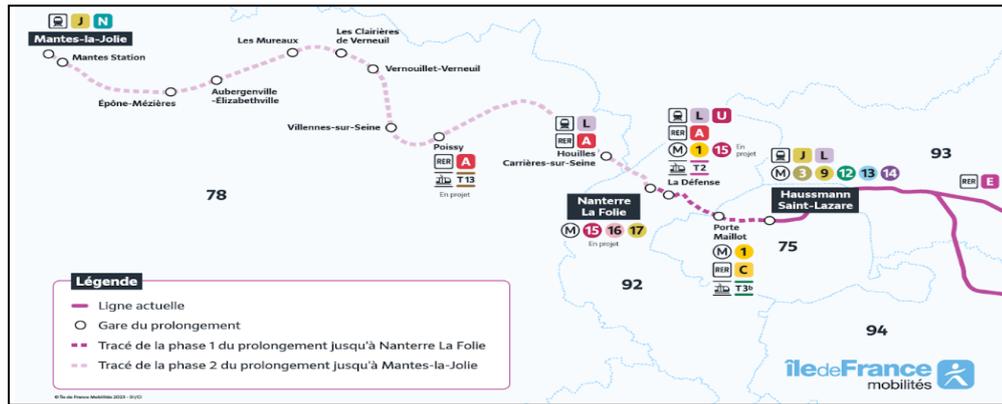


Figure 5 : Plan du prolongement du RER E de Saint-Lazare à Mantes-la-Jolie [source : ilede-France-mobilites.fr]

I.2.2 Besoins du client

Dans cette partie, seuls les besoins liés à mon stage seront mentionnés qui ne représentent qu'une partie des besoins liés au projet qui ont été présentés par NGE à SMF.

Etant chargé de la construction des voies ferrées sur béton en tunnel, NGE souhaite avoir une vue d'ensemble de l'état des différents travaux qui ont été réalisés dans l'ouvrage. Il s'agira en d'autres termes de distinguer à travers une visite virtuelle les zones qui ont été traitées, qui doivent être traitées ou qui sont inachevées. Pour parvenir à ses objectifs, NGE souhaite :

- ❖ un levé 3D de l'ouvrage et des photos HD (High Definition) pour relever les détails non perceptibles par le levé 3D ;
- ❖ une intégration des photos HD dans le levé 3D : une intégration par superposition des photos HD au levé 3D ;
- ❖ distinguer sur le levé les tags blancs (étanchéités blanches), les tags gris (étanchéité grises) et intégrer des données (informations textuelles et fichiers) liées à ses tags ;

Un livrable constitué d'une visite virtuelle du tunnel, d'un nuage de points nettoyé, de coupes longitudinales, transversales et de plans développés de l'ouvrage est attendu à la fin de ce travail via la plateforme Datatys.

I.2.3 Proposition de SOCOTEC et acquisition des données

I.2.3.1 Proposition de SOCOTEC

Afin de réaliser le souhait de son client, l'équipe PFI (Projet France International) de SMF propose de mettre en place deux plateformes de visualisation 3D adaptées aux besoins de son client et aussi mettre en place une chaîne de traitement afin de réutiliser ses plateformes pour répondre aux éventuels besoins d'autres clients.

Après l'acquisition de données à l'aide du Scanner laser RTC360 et un appareil photo HD, SONY Alpha 7R V / A7R V, l'équipe propose d'abord de mettre en place une visite virtuelle en se servant des images panoramiques issues du scanner. Cette visite virtuelle sera produite par un outil open source nommé Marzipano. Puis ce produit, qui est une application sera par la suite personnalisée de sorte qu'elle intègre les photos HD. Ensuite, pour distinguer les différents tags mis en place et connaître l'état des différentes zones à traiter, l'équipe décide de développer un outil. Ce dernier aura pour le rôle de matérialiser les capteurs et intégrer dans ces capteurs matérialisés tous les types de données (informations textuelles, les fichiers, les images).

Également, pour permettre une visualisation des données à grande échelle Socotec souhaite mettre en place un SIG3D basé sur un outil open source : Itowns. Ce SIG couplé à la visite virtuelle doit être à mesure d'intégrer les nuages de points et les couches d'information géographique utiles telles que : cadastre, route, administrative et MNT (Modèle Numérique de Terrain).

I.2.3.2 Acquisition de données

N'ayant pas pris part aux différentes acquisitions de données, nous tâcherons de détailler au mieux l'acquisition des données.

L'équipe PFI est intervenue sur le projet d'entonnement Haussmann Saint-Lazare, sa zone d'intervention est de 300m le long du tunnel. Elle a utilisé le scanner laser 3D Leica RTC 360³ (Figure 7) ainsi qu'un appareil photo SONY Alpha 7R V⁴ (Figure 6) pour l'acquisition des données. Cette opération s'est déroulée en deux phases : une acquisition en surface et une acquisition à l'intérieur du tunnel. Le scanner a été configuré de sorte à avoir comme données brutes des nuages de points et une image sphérique (format d'image panoramique 360°) par scan réalisé.

³ Fiche technique : <https://leica-geosystems.com/fr-ma/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>

⁴ Fiche technique : <https://www.magazinevideo.com/fiche-technique/sony-alpha-7r-v/41400.htm>



Figure 7 : Appareil photo SONY Alpha 7R V
[Source : Techradar]



Figure 6 : scanner laser 3D Leica RTC 360
[Source : Leica geosystems]

Concernant l'acquisition en surface, l'objectif était d'obtenir une vue esthétique et globale de l'extérieur, notamment le long du boulevard Haussmann. Il y a donc eu 17 stations de scans qui ont été positionnées les unes après les autres. Les stations ont été posées de sorte à avoir un bon recouvrement entre les nuages de points ou une inter visibilité entre les stations pour faciliter le traitement des données.

66 scans ont été réalisés à l'intérieur du tunnel. Les scans ont été réalisés en fonction des points kilométriques du tunnel (Figure 8). Chaque station de scan a été positionnée pour assurer une couverture optimale des nuages de points. Cela garantit une visibilité des stations favorisant la collecte de données précises et exactes. De plus, l'appareil photo HD a été utilisé tous les 10 mètres pour capturer tous les détails du tunnel. L'utilisation de l'appareil photo HD permet d'avoir plus de 1000 images hautes résolutions favorisant une documentation visuelle détaillée des conditions internes du tunnel qui n'apparaissent pas assez finement dans les nuages de points.



Figure 8 : Plan 2D du tunnel

I.3 ETAT DE L'ART

I.3.1 MARZIPANO : UN OUTIL OPEN SOURCE POUR LA VISITE VIRTUELLE

Nous disposons aujourd'hui d'une panoplie d'outils dédiés à la réalisation de visite virtuelle. Parmi cette gamme d'outils disponibles, il y en a qui sont gratuits comme Pannellum, Marzipano, Photosphère viewer, Kaléidoscope. D'autres par contre sont payants on peut citer : Kuula, Memento 360player.io [theta360.guide]. Nous allons dans la suite nous intéresser particulièrement à l'outil open source Marzipano, choix de SMF.

I.3.1.1 Généralités sur Marzipano

Fondée en 2011 par Manuel Cabral et son père Antonio Cabral, Digisfera est une start-up portugaise spécialisée dans la photographie au sein de laquelle Marzipano a été initialement développé. N'étant pas une application open source à l'origine, Marzipano est uniquement dédié à la réalisation des projets de la start-up [Tiiny.host,2015] et [Venture.beat,2015].

Mais en 2015, dans le but de renforcer son service « Street view », Google rachète la start-up. Ainsi, il ajoute Marzipano à son arsenal technologique. Google décide par la suite de rendre l'outil open source, ce qui a permis aux développeurs de l'utiliser et de contribuer à son développement [Clubic,2015].

Marzipano est une bibliothèque JavaScript, un outil open source utilisé pour réaliser des visites virtuelles immersives et interactives à partir de différents types de données, par exemple les panoramas. Cette visionneuse nous permet de visualiser nos images panoramiques à 360° en tournant sur un point central. Marzipano nous permet une interaction avec le contenu, par exemple en cliquant sur des « Hotspots »⁵ pour obtenir plus d'informations, et en naviguant entre différentes scènes⁶ par le biais des « Link hotspots »⁷. La visite virtuelle réalisée avec Marzipano est exportable sous la forme d'un fichier zippé de légère taille 55Ko (kilo Octet). Ce produit est personnalisable avec les standards du web.

⁵ Objet permettant d'intégrer des informations dans la visite virtuelle

⁶Une scène représente une image panoramique intégrée dans marzipano

⁷ Objet assurant la transition entre deux scènes

I.3.1.2 Format de données

Marzipano est une puissante visionneuse 360° qui est compatible avec le format d'image panoramique sphérique notamment les images équirectangulaires dont le rapport de la largeur sur la hauteur est de 2 :1. Selon le dictionnaire Larousse une image panoramique est une image qui offre un très grand champ de vision et permet une très bonne visibilité. Une image panoramique sphérique couvre un angle de 360° verticalement et horizontalement. Les images équirectangulaires sont issues d'une projection cylindrique équidistance (projection aphyllactique⁸ au cours de laquelle le globe est projeté sur la surface d'un cylindre transformant ainsi les méridiens en droites verticales équidistantes et les parallèles en droites horizontales équidistantes) des images sphériques 360°.

I.3.1.3 Mode de fonctionnement

Pour avoir une visite virtuelle, (Figure 9) il faut définir un « viewer » qui sera chargé de la gestion des scènes « SCENES » de la visite virtuelle. Une scène est caractérisée par 3 éléments indispensables : une vue « View », une source « Source » et une géométrie « Geometry ». Un « View » définit la perspective par laquelle la scène sera observée. La scène a une géométrie cubique dont la texture provient de la source. Une « Source » est composée de tuiles (tiles) d'images issues de la texture 2D des faces cubiques obtenues lors de la transformation de notre image panoramique en carte cubique « cubemap ». La carte cubique représente en effet une texture, et cette texture est constituée de 6 textures plans qui représentent chacune les faces d'un cube suivant les 6 directions (x ; -x ; y ; -y ; z et -z) de l'espace.

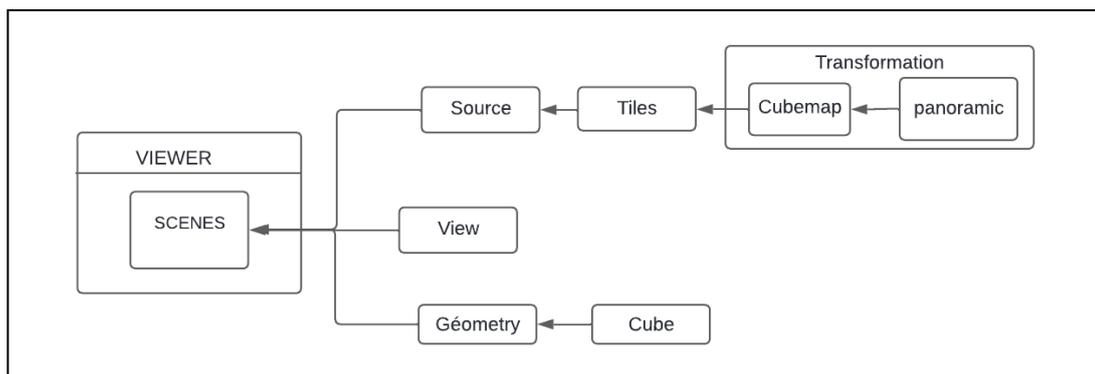


Figure 9: Structure de base de Marzipano

⁸ Projection aphyllactique : C'est une projection qui n'est ni conforme ni équivalente

I.3.2 THREE JS

Three.js est une bibliothèque Java Script utilisée pour la création, l’affichage et la manipulation des objets 3D dans le navigateur. Cette bibliothèque utilise WebGL (Web Graphics Library), une API (Application Programming Interface) JavaScript (qui sert nativement à dessiner des points, des lignes et des triangles) pour ses rendus graphiques à travers un Canvas dans un navigateur.

La structure de base de la bibliothèque three.js est relativement simple. Selon l’arborescence de la Figure 10 , pour avoir un rendu 3D « Renderer » il faut une scène « scene » qui représente le conteneur des objets 3D, contenue dans le Renderer [source : Ivo MATOSINHOS,2019]. Et une caméra « Camera » qui définit l’angle à partir duquel la scène sera visible. La scène est à son tour formée d’un maillage « Mesh » entre la géométrie « Geometry » qui représente la forme de l’objet et le matériau « Material » qui définit la propriété de surface (couleur, brillance) utilisée pour représenter la géométrie de l’objet, à cela s’ajoute la caméra et l’éclairage « Light » pour la visibilité de la scène. La texture est généralement une image qu’on applique à la surface d'un matériau pour lui donner un aspect détaillé [Three.js.org].

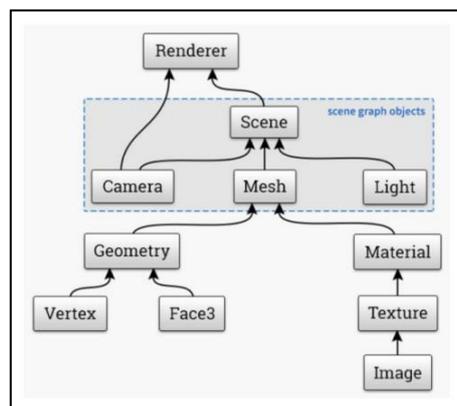


Figure 10 : Structure de base de Three.js [source : Ivo MATOSINHOS,2019]

I.3.3 GEOREFERENCEMENT

Le géoréférencement désigne le fait de rattacher ou de transformer l’ensemble des coordonnées de ses données dans un système autre que celui dans lequel elles ont été acquises [Elise Lachat ,2019]. Il y a deux approches pour parvenir à un nuage de points géoréférencés (Figure 11) : géoréférencement direct et indirect [Landes and all,2011].

Le premier consiste à stationner sur un point connu en coordonnées permettant ainsi à l'ensemble des coordonnées des points du nuage d'être dans le même système de projection [Maxime Marchand,2018]. Le second représente un post-traitement dans lequel les nuages sont assemblés c'est-à-dire alignés [Elise Lachat, 2019]. Cet alignement consiste à identifier des points homologues (par consolidation basée sur les cibles⁹ ou sur les points caractéristiques¹⁰) afin d'avoir un bon taux de recouvrement et une cohérence entre les nuages puis à lever ces points par la méthode topographiques [Landes and all,2011]. Cette approche est comme l'une des méthodes de transformation de systèmes géodésiques : transformation d'Helmert 3D à six paramètres [Delsart Benjamin, 2020].

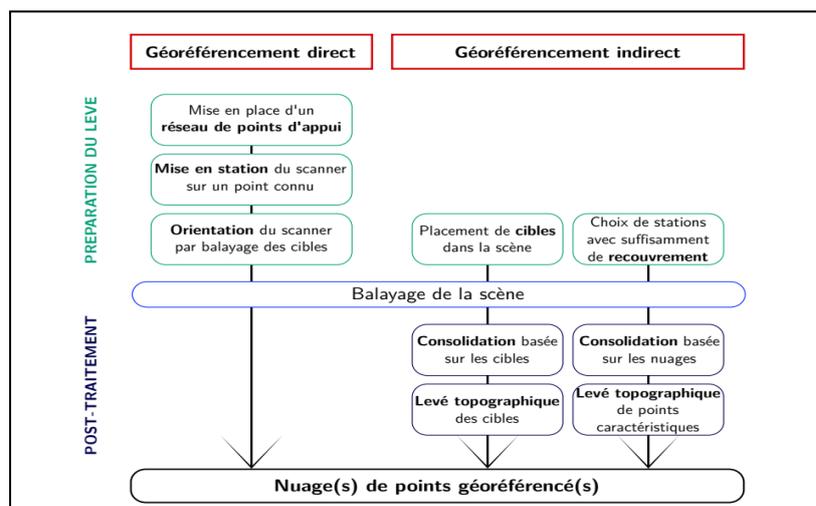


Figure 11 : Approches comparées de géoréférencement direct et indirect dans le cas d'un levé par scanner laser terrestre [source : Landes et al., 2011]

I.3.4 DONNEES SPATIALES 3D : LES NUAGES DE POINTS

Les nuages de points représentent un environnement tridimensionnel numérisé à l'aide d'appareils comme le scanner laser. De manière plus explicite, ils représentent un ensemble de points de coordonnées connues dans un système tridimensionnel. En plus de leurs coordonnées, ils peuvent avoir des composantes colométriques, RGB (Red, Green and Blue) [Grilli, E., Menna, F. & Remondino, F. (2017)] et [Landes and all,2011]. [Landes and all,2011] expliquent que ces nuages sont acquis avec une certaine densité représentant l'espacement entre deux points levés. Plus cette distance est petite, plus nous

⁹ Réflecteurs ou prismes

¹⁰ Les coins de bâtiment ou sommet de montagne

aurons un nuage de points dense et plus elle est grande, plus la densité faiblie. Il faut également noter qu'il existe un paramètre appelé résolution spatiale du nuage qui définit un seuil au-delà duquel les nuages de points sont moins denses. L'utilité d'un nuage de points dépend de son état. Les nuages de points bruts sont moins clairs. Lorsqu'ils sont traités nous pouvons extraire un maximum de données. Grâce aux nuages de points nous pouvons extraire des produit 2D tels que les coupes, plans et profils, des produits 3D des MNT, MNS, MNE nous pouvons également constituer des maquettes BIM¹¹ à travers des logiciels de modélisation 3D [Landes and all,2011].

I.3.5 Itowns, une librairie de SIG en ligne

Grâce à l'essor de la technologie plusieurs systèmes d'informations ont intégré la fonctionnalité de la visualisation 3D des données géospaciales, c'est le cas d'Itowns qui fera l'objet de notre état des lieux dans cette partie.

I.3.5.1 Introduction à Itowns

Financé par l'ARN (Agence Nationale de la Recherche) de 2008 à 2011, l'IGN met en place un projet de recherche visant premièrement à acquérir de grandes quantités de données géolocalisées notamment des données images et lidar au moyen de divers capteurs embarqués sur un véhicule de cartographie mobile Stéréopolis puis à mettre en place un outil de visualisation à travers un navigateur de ces données. Itowns était donc un outil de visualisation mis en place par l'IGN, précisément par le laboratoire de recherche MATIS [Mirela Konini and all ,2019].

Initialement basé sur la technologie flash, le projet itowns s'est concentré sur la visualisation des résultats d'algorithmes automatiques d'extraction d'informations tels que les marquages au sol, la végétation sur les images. Notons également la possibilité de naviguer entre les images panoramiques et aussi l'intégration des nuages de points dans certaines zones [Mirela Konini and all ,2019].

En sus des fonctionnalités mentionnées, l'IGN a continué à développer cet outil grâce à des projets innovants. En février 2016, l'IGN décide de mettre en open source la première version 1.0 de son framework Itowns. Cette décision émane de l'idée de faire

¹¹ BIM :Building Information modeling

connaître ou populariser son produit à la communauté mondiale de développeurs et aussi de recevoir en retour des avis constructifs qui pourront parfaire leur outil. Le projet est donc ouvert à la contribution externe. En parallèle, l'IGN a mis en place la nouvelle version 2.0. Cette version, en plus d'intégrer les fonctionnalités de la précédente, regorge d'autres fonctionnalités, par exemple la création du globe 3D et l'intégration de tous types de données géospatiales [Vincent Picavet and all ,2016].

Aujourd'hui le moteur de visualisation 3D du Géoportail, Itowns ne cesse de croître. Il s'impose comme l'une des meilleures bibliothèques open source, à la fois puissante et gratuite, capable de visualiser les données géospatiales, d'afficher, de superposer et de manipuler les différentes couches à l'aide des services WMS (Web Map services) et WFS (Web Features Services) et de ses API. Il est aussi utilisé dans d'autres applications à des fins autres que la visualisation 3D.

I.3.5.2 Quelques caractéristiques de Itowns

Itowns est une bibliothèque open source écrite en JavaScript, basée sur la technologie du WebGL pour ses rendus graphiques 3D interactifs. Il offre également la possibilité d'afficher des cartes en 2D. Il dispose d'une documentation détaillée et d'exemples pour une mise en place [GitHub Itowns].

Aussi, support de plusieurs sources de données, Itowns permet grâce aux services WMS d'afficher et de superposer les différentes cartes ou couches géoréférencées. Il favorise la manipulation et l'affichage des données vectorielles à l'aide des services WFS. Il permet aussi l'affichage et la manipulation de tuiles de carte grâce aux services WMTS (Web Map Tiles Services) [Geoservices, 2014]. Il permet d'intégrer et d'afficher les nuages de points issus des données.

Pour l'intégration des données, il est important que celles-ci soient dans un format compatible avec Itowns et qu'elles soient géoréférencées dans le système de coordonnées géodésiques WGS84, géographique ou géocentrique, système natif de itowns. Il est également possible de définir un système de coordonnées grâce au formalisme « proj4¹² ». Concernant les couches dans itowns on a 5 grandes familles de couches :

- ❖ GeometryLayer : Utilisées pour afficher des objets 3D (building) ;

¹² Proj4 : bibliothèque permettant la transformation d'un système de coordonnées à un autre

- ❖ ElevationLayer : Utilisées pour afficher des couches 3D (MNT) ;
- ❖ ColorLayer : Utilisées pour afficher des données rasters ou vectoriel ;
- ❖ PointCloudLayer : Utilisées pour l’affichage des nuages de points ;
- ❖ OrientedImageLayer : Utilisées pour l’affichage des images orienté ;

II REALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE ET DEVELOPPEMENT D’UN OUTIL POUR L’INTEGRATION DE CAPTEURS

II.1 ETAPES DE LA REALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE

Après l’acquisition des données par le scan 3D, nous avons obtenu deux dossiers (Figure 12), l’un contenant les images panoramiques sphériques 360° et l’autre les nuages de points 3D brutes. Grâce au logiciel Leica Cyclone 3DR, nous avons importé le dossier des images panoramiques sphérique puis nous avons exporté ces images avec une taille moyenne de 30 Mo (Mégaoctet), une résolution de 20480*10240 et une profondeur de 24 bits/pixel.

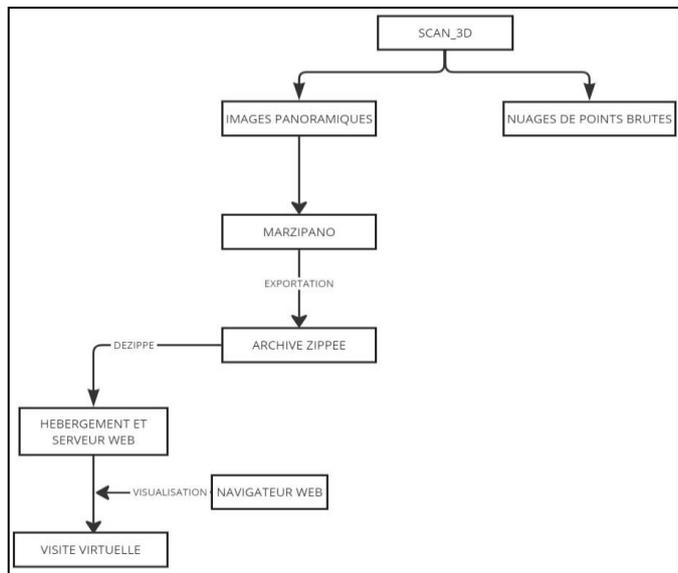


Figure 12 : Les étapes de la réalisation d’une visite virtuelle dans Marzipano

En somme, nous avons 17 images panoramiques sphériques 360° issues de l’acquisition des données à l’extérieur de la gare Haussmann Saint-Lazare, 66 images sphériques issues de l’acquisition des données dans le tunnel et plus de 1000 images HD (Ce sont les images hautes définition, des images de meilleures résolutions et clartés) issues de l’appareil photo SONY Alpha 7R V.

Pour réaliser la visite virtuelle, nous avons importé dans l’outil marzipano l’ensemble des images panoramiques issues de l’acquisition de données. Une fois nos images importées nous avons sélectionné la fonctionnalité d’autorotation (rotation

automatique des scènes de la visite virtuelle sur elles-mêmes) que nous voudrions avoir dans notre visite puis nous avons exporté le produit final.

Nous avons réalisé deux visites virtuelles, une pour les données acquises à l'intérieur du tunnel (47/66 images panoramiques ont été utilisées car les autres ne couvraient pas l'intérieur du tunnel) et une autre pour l'extérieure (17 images panoramiques ont été utilisées).

La visite virtuelle étant réalisée (Figure 13) et exportée, il est important qu'elle soit à présent visualisée à travers un navigateur web. Il faut au préalable un serveur web. Nous nous sommes servis du serveur de SMF pour la visualisation de notre application et également pour son hébergement. Il existe des technologies servant à mettre en place un serveur Web¹³ pour la visualisation de sa propre visite virtuelle.

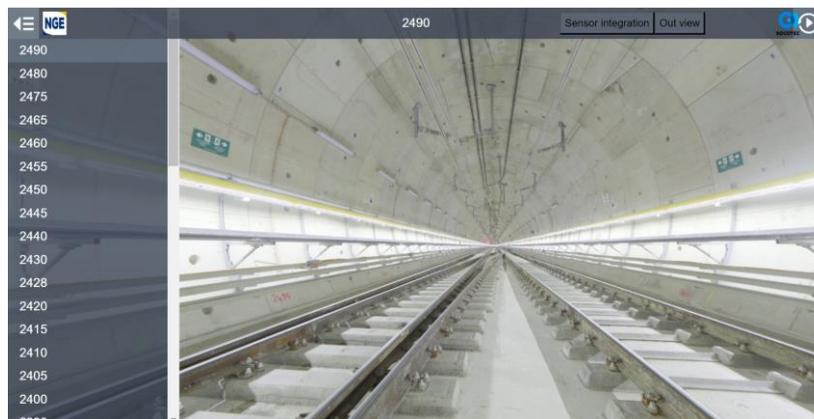


Figure 13 : Aperçu de la visite virtuelle du tunnel [source : Marzipano]

II.2 PERSONNALISATION DE LA VISITE VIRTUELLE

II.2.1 Intégration des images HD dans la visite virtuelle

L'intégration des images est un moyen par lequel l'utilisateur pourrait visualiser tous les détails moins perceptibles ou invisibles sur la visite virtuelle. Dans cette optique l'affichage des images HD dépend de la scène sélectionnée par l'utilisateur. Nous avons donc rangé premièrement dans des dossiers les images HD en fonction des scans. (1) Un code python nous génère dans chaque dossier un fichier txt contenant le lien de chaque image du dossier (Figure 14). (2) Lors du clic de l'utilisateur sur une scène, notre programme se charge de récupérer l'identifiant (le numéro) de la scène sélectionnée. (3)

¹³ Technologie servant à mettre en place son serveur web : L'extension « Live server (five server) » ; node.js ; le module SimpleHTTPServer de python ; Apache.

Puis récupère le lien du fichier txt de la scène sélectionnée grâce à une correspondance entre l'identifiant de la scène et un tableau (contenant le lien menant aux fichiers txt de chaque dossier) que nous avons manuellement renseigné. (4) Enfin il affiche l'ensemble du contenu du fichier sur l'interface.

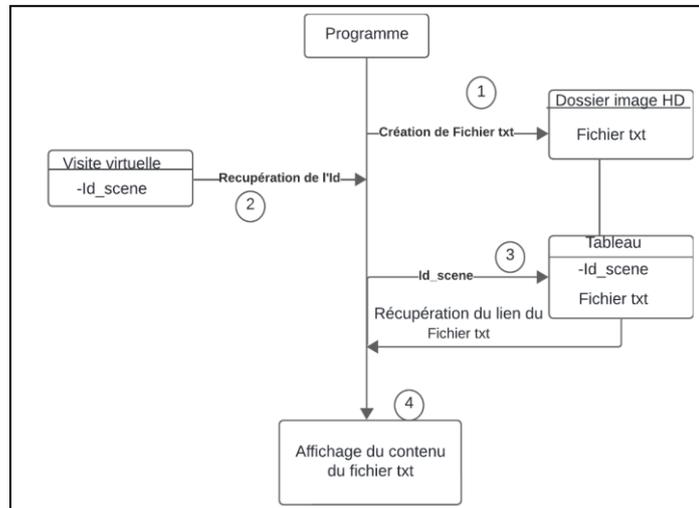


Figure 14 : Schéma du concept de l'intégration des images HD dans la visite virtuelle

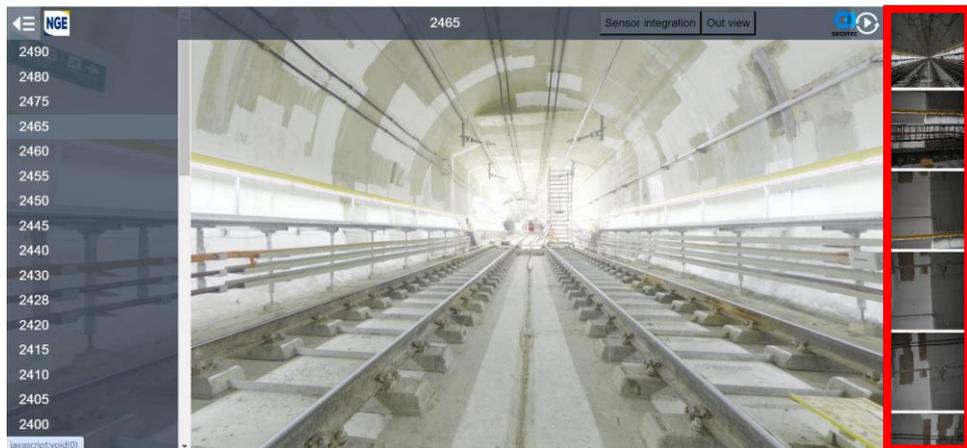


Figure 15 : Aperçu de l'intégration des images HD à droite de l'interface de la visite virtuelle

II.2.2 Problème lié à l'intégration des images HD et proposition de solution

Le problème de l'intégration des images HD dans la visite virtuelle est lié à la taille des images HD. En effet, Chaque image HD pèse en moyenne entre 17000 et 25000 Kb (Kilo bits) donc en intégrant ces images dans la visite virtuelle, cela ralentit le chargement de la page. Notre solution pour l'optimisation est de réduire la taille des images HD à afficher sur notre visite virtuelle. Nous avons réalisé un code qui permet de redimensionner au format «300*300 » chaque image HD contenues dans un dossier que nous rentrons en

paramètres afin qu'elles soient prévisualisées dans la visite virtuelle. Elles seront affichées à haute résolution lors du clic de l'utilisateur pour effectuer un zoom.

II.2.3 Mise en place d'une application open source pour effectuer le zoom sur les images HD

Nous avons la possibilité d'effectuer des actions de zoom arrière et avant dans la visite virtuelle. Toutefois, la qualité des images n'est pas optimale ce qui entraîne la non visibilité de certaines informations comme des informations murales du tunnel et les fissures. Pour résoudre le problème SMF s'est muni d'un appareil photo (SONY Alpha 7R V) pour l'acquisitions d'images HD de meilleure résolution. Les images étant de meilleure résolution, il est donc nécessaire d'ajouter une fonctionnalité de zoom pour visualiser les détails manquants dans la visite virtuelle.

Il existe plusieurs applications open source permettant de réaliser un zoom [Turbofuture,2023]. Parmi ces applications nous avons choisi « Zoomist », une application essentiellement écrite en HTML, CSS et JS dont l'interface est telle qu'une page blanche comportant une zone dédiée à réceptionner les images afin de réaliser les actions de zoom. La fonctionnalité principale de cette application est le zoom et le déplacement (possibilité de déplacer l'image lors du zoom), caractérisée respectivement par le paramètre « zoomer » dans la Figure 16. Le zoom de cette application est défini par une échelle représentée par le paramètre « maxScale » Figure 16, les autres paramètres de la Figure 16 sont facultatifs.

```
const zoomist = new Zoomist('.zoomist-container', {  
  // Optional parameters  
  maxScale: 4,  
  bounds: true,  
  // if you need slider  
  slider: true,  
  // if you need zoomer  
  zoomer: true  
})
```

Figure 16 : Code js pour initialiser le zoom [source : Zoomist]

```
<!-- zoomist-container -->  
<div class="zoomist-container">  
  <!-- zoomist-wrapper is required -->  
  <div class="zoomist-wrapper">  
    <!-- zoomist-image is required -->  
    <div class="zoomist-image">  
      <!-- you can add anything you want to zoom here. -->  
        
    </div>  
  </div>  
</div>
```

Figure 17 : Code html indispensable pour l'affichage des images [Source : Zoomist]

Le GitHub et le site web de l'outil décrivent plusieurs moyens pour une mise en place de l'application. Nous avons utilisé « npm », le gestionnaire des packages par défaut de node js pour l'installation de l'application.

Une fois le package ajouté à votre espace, il est important d'importer les dépendances de l'outil dans votre page web. Pour que la fonctionnalité zoom soit effective,

il nous faut un conteneur d'images. Ce conteneur est créé par le code html de la Figure 17, code à insérer dans la balise « body ». Puis nous avons initialisé le zoom par le code js de la Figure 16 en entrant en paramètre le conteneur de nos images et en définissant le paramètre « maxScale » à « infinity » pour permettre à l'utilisateur de profiter de l'entendu du zoom.

Cette application s'ouvre grâce à une fenêtre (Figure 18) lorsque l'utilisateur clique sur une image HD dans la visite virtuelle. Parallèlement, lors du clic, le lien de l'image HD sur laquelle est effectuée le clic est récupéré puis inséré dans le conteneur de l'application Zoomist.

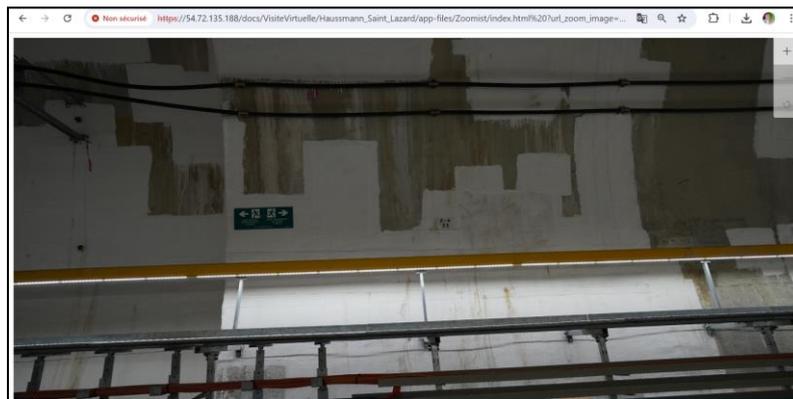


Figure 18 : Intégration d'une image HD dans l'application Zoomist

II.3 DEVELOPEMENT D'OUTIL POUR L'INTEGRATION DE CAPTEURS

II.3.1 Le rôle de l'outil

Pendant la phase de réalisation de la visite virtuelle c'est-à-dire avant l'exportation du produit final, nous sommes en mode édition et nous avons la possibilité d'ajouter à notre visite des « hotspots » et des « link-hotspots » (Figure 19 et Figure 20) . Les « hotspots » ajoutés pendant cette phase sont identiques (couleur) et diffèrent de leur position et des informations (uniquement du texte) qu'on souhaite leur intégrer. En dehors de cette phase il nous est impossible d'ajouter ou de modifier ces éléments ajoutés à la visite virtuelle.

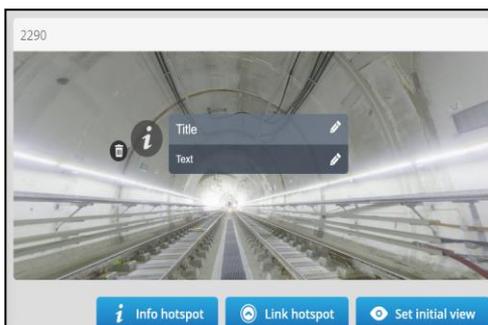


Figure 20 : Intégration d'un hotspot pendant la phase de réalisation de la visite virtuelle [Source : Marzipano]

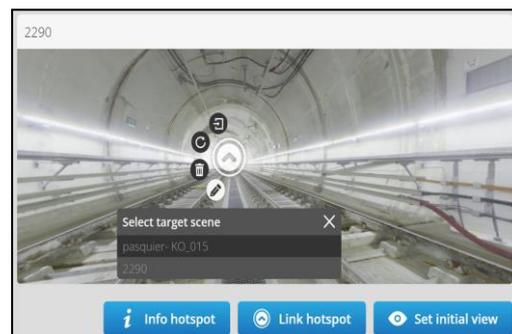


Figure 19 : Intégration d'un link-hotspot pendant la phase de réalisation de la visite virtuelle [Source : Marzipano]

Notre rôle à nous est de mettre en place un outil capable d'interagir avec notre visite virtuelle après l'exportation du produit final par l'intégration des « hotspots » et des « link-hotspots ». De manière plus explicite l'outil doit être à mesure de matérialiser les « hotspots » et de les différencier à travers des couleurs. Puis l'outil doit intégrer à chaque « hotspot » les informations qui lui sont associées et se trouvant à notre disposition. Les informations seront généralement des textes et les données des fichiers dans différents formats (.csv, .txt, .pdf, png etc.) à visualiser sous la forme d'un déroulé lorsqu'on cliquera sur le hotspot (le capteur matérialisé). Enfin il doit également être à mesure d'intégrer des « link-hotspots » pour faciliter le passage d'une scène à une autre.

II.3.2 Mise en place de l'interface utilisateur de l'outil

L'interface utilisateur de notre outil a été faite comme un formulaire de renseignement, c'est donc une page web qui s'ouvre dans une fenêtre à chaque authentification. Il a été développé en HTML, JS, CSS et PHP.

Pour intégrer un « hotspot », il faut sa position dans le système de coordonnées de Marzipano (yaw et pitch) qui représentent des angles respectivement horizontal et vertical, son titre, la scène et une image qu'on appellera couleur (nous avons créé les couleurs grâce au logiciel Photoshop). Nous avons 2 moyens pour intégrer les données liées à un « hotspot ». Le premier consiste à définir une zone dédiée au code html où l'utilisateur à travers des balises html (« iframe » et « p ») insère respectivement ses fichiers et données textuelles. La deuxième approche consiste à créer deux objets html l'un permettant d'accéder aux fichiers en local et l'autre permettant de saisir des informations textuelles (Figure 22). L'intégration du « link-hotspot » dépend uniquement de la scène, de la position, du paramètre rotation qui donnera le sens d'orientation du « link-hotspot » et de la cible qui sera la scène destinée à être visualisée lors d'un clic sur le « link-hotspot ».

(1) Si l'utilisateur souhaite intégrer un « hotspot » ou un « link-hotspot », il lui suffira de double-cliquer sur la position souhaitée. (2) Cette position caractérisée par ses coordonnées (yaw et pitch) est récupérée par un code JS puis envoyée grâce à la propriété « localStorage » des navigateurs à notre outil ainsi que toutes les scènes de la visite virtuelle. Une fois la position envoyée à notre outil, l'utilisateur ne peut plus la modifier. Le rouge de la Figure 21Figure 22 traduit les paramètres que l'utilisateur ne peut modifier. Ayant accédé à l'interface de l'outil, (3) complète les autres paramètres en fonction du choix qu'il aura fait (création de « hotspot » et de « link-hotspot »). En plus de ses paramètres qui dépendent de l'objet à créer, l'utilisateur doit donner un nom au fichier JS

qui sera créé à la fin de l'opération. (4) Une fois le tout renseigné, notre navigateur envoie une requête AJAX JQUERY à notre serveur Web, contenant nos paramètres. Notre Script PHP est directement lancé par notre serveur, le script récupère nos paramètres puis les insère dans le fichier JS dont le nom est inséré par l'utilisateur et ce fichier est directement lu par notre application de la visite virtuelle.

En somme, notre outil crée à chaque utilisation un fichier JS nommé par l'utilisateur, fichier sauvegardé par l'outil soit dans le dossier (préalablement créé) « hotspots » ou « link-hotspots » en fonction de l'objet créé.

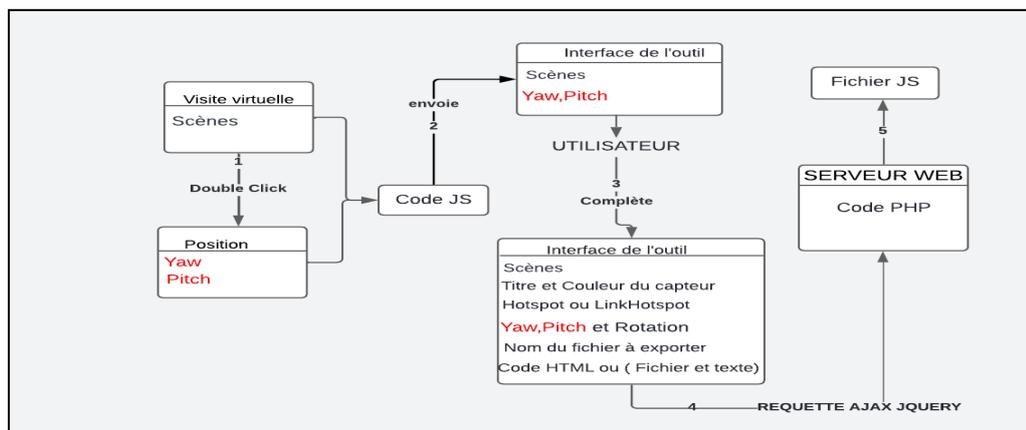


Figure 21 : Schéma de la conception de l'outil d'intégration des capteurs

Figure 22 : Interface de l'outil d'intégration des capteurs

II.3.3 Intérêt de l'outil

Les « hotspots », considérés comme des capteurs représentent pour le suivi de notre ouvrage des objets qui intégreront des informations capitales. Comme décrit dans la partie II.3.1 par notre outil, les hotspots pourront intégrer d'autres types de données en plus des informations textuelles à savoir les images, les graphes, les documents téléchargeables, les liens hypertextes.

Après la réalisation de notre outil, nous serons chargés de le présenter à une autre équipe. Elle l'utilisera pour intégrer toutes les données du client (NGE) liées à la visite virtuelle. Les données du client permettront de distinguer les différentes zones où les tags ont été appliqués dans la visite virtuelle. L'équipe sera chargée d'intégrer en moyenne 700 hotspots sur toutes les scènes de la visite virtuelle.

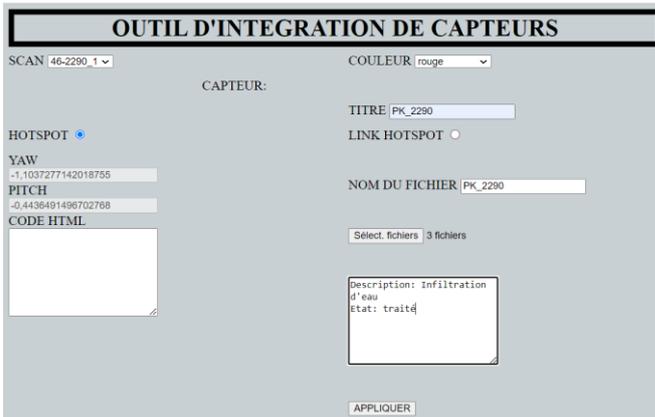


Figure 23 : Intégration d'un hotspot à travers l'outil



Figure 24: Aperçu de l'ajout du hotspot et de ses données

Nous avons intégré à travers notre outil (Figure 23) un hotspot de couleur rouge (couleur pris au choix) (Figure 24). A cet hotspot, nous avons lié une information textuelle « Description : Infiltration d'eau » lié à son contenu trois documents téléchargeables.

III TRAITEMENT DES DONNEES ET PROCEDURE DE MISE EN PLACE D'UN SIG 3D

III.1 TRAITEMENT DES DONNEES

Le livrable du client comme signifié dans l'introduction, est constitué de nuages de points nettoyés et de plans 2D tels que les coupes transversales et longitudinales et les plans développés. Pour parvenir à notre objectif, il est important de procéder aux traitements du nuage de points du tunnel. Les traitements seront réalisés sur le logiciel cloud compare.

III.1.1 Nettoyage des nuages de points

D'abord, après l'acquisition des nuages de points brutes nous avons commencé à les assembler par le biais du logiciel Leica Cyclone 3DR. Assembler un nuage de points consiste à les recaler les uns par rapport aux autres de sorte à avoir un bon taux de recouvrement et un nuage d'ensemble issu des différents scans. Assembler des nuages

permet également de rassembler les nuages de points issus de différents scans dans un même repère. Ensuite nous avons procédé au nettoyage du nuage de points assemblé, ce nettoyage consiste à retrancher les objets non désirés dans le nuage de points afin de garder que l'essentiel. En effet, il y avait tout un dispositif matériel et des équipes présents pour certains travaux lors de la numérisation du tunnel. Nettoyer notre nuage nous permet d'avoir un nuage propre et moins lourd. Pour nettoyer notre nuage de point, nous utilisons l'outil « cross section », puis l'outil « slices » de Cloud compare pour subdiviser notre nuage en plusieurs tronçons suivant l'axe des abscisses, puis nous utilisons l'outil « segment » de cloud compare pour supprimer l'objet qu'on souhaite enlever dans chaque tronçon. Enfin, nous utilisons l'outil « merge multiple clouds » pour assembler tous les tronçons pour former un seul nuage.



Figure 25:Aperçu du nuage de point décimé du tunnel sur potree

III.1.2 Produits 2D : Coupes et déroulés

Les plans 2D sont des produits issus du traitement des nuages de points à travers les outils adéquats. Pour produire ces plans 2D nous avons utilisé les outils du logiciel Cloud Compare. En raison de sa taille, nous avons décimé le nuage de points nettoyé de notre tunnel à 1cm ,5cm et à 10cm dans l'optique de faciliter le traitement au niveau du logiciel. Décimer un nuage de points à « x cm » c'est de le réduire de sorte à obtenir une distance de « x cm » entre chaque point.

III.1.2.1 Les coupes : transversales et longitudinales

Une coupe transversale représente une coupe perpendiculaire à l'axe longitudinale de l'objet (Figure 27). La coupe longitudinale représente une coupe parallèle à l'axe longitudinale de l'objet (Figure 28). Nous avons réalisé les différentes coupes transversales à chaque variation du diamètre du tunnel (la Figure 26). Pour réaliser les plans 2D, nous avons à nouveau utilisé les outils « cross section » puis « slices » de cloud compare tout en cochant le paramètre 'extract contour(s)' pour produire des contours sur chaque tronçon généré par les outils « cross section » et « slices » de cloud compare.

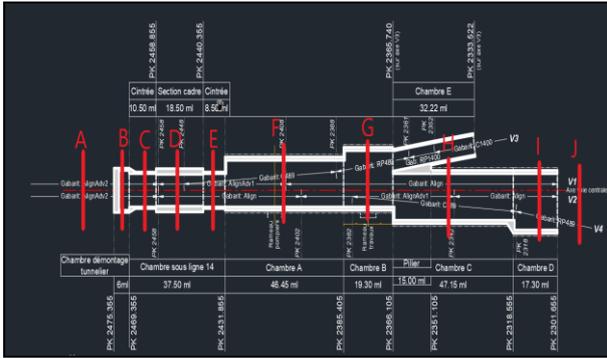


Figure 27 : Division du plan du tunnel par variation de diamètre

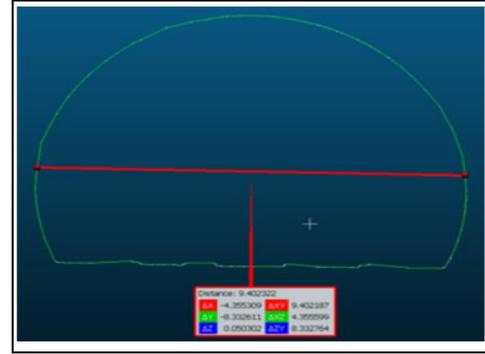


Figure 26 : Coupe transversable de la section J de la figure ci-contre



Figure 28 : Coupe longitudinale du tunnel

III.1.2.2 Les déroules ou plans développés

Ils représentent une rasterisation d'un nuage de points suivant une direction de projection c'est-à-dire une conversion du nuage en niveau de grille 2,5D suivant un axe donné. Le résultat obtenu est généralement sauvegardé au format d'image raster « géotiff » [Cloudcompare.org, 2024]. L'outil utilisé est « Rasterize » accessible dans le menu « Tools> Projection » du logiciel cloud compare. Nous avons modifié certains paramètres afin de générer nos plans développés. Nous avons modifié la valeur du paramètre « direction » de projection à « z » pour obtenir une vue de dessus de notre ouvrage sur un niveau de grille. Nous avons également modifié la valeur du paramètre « active layer » à « RGB » ainsi les différentes cellules de la grille générée auront les mêmes composantes colométriques que notre nuage de points. Cette option est disponible à partir de la version 2.13.1 de cloud compare. Nous avons réalisé plusieurs sections du nuage sur lesquelles nous avons réalisé nos différents plans développés (Figure 29).

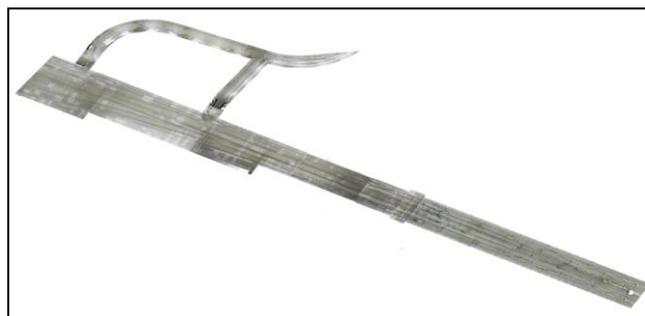


Figure 29 : Aperçu d'une section du nuage de point rasterisée

III.2 PROCEDURE DE MISE EN PLACE DU SIG 3D : Itowns

III.2.1 Installation du package d'itowns

Le GitHub et la documentation de itowns renferment assez d'informations qui détaillent les différentes étapes d'installation du Framework. Il existe deux moyens pour accéder au package d'installation d'itowns. Nous avons npm, le gestionnaire de package par défaut de node.js ou directement à partir du code sources disponible sur le GitHub d'itowns. Premièrement nous avons téléchargé le code source de l'application depuis son dépôt GitHub pour avoir accès à l'ensemble du package et des données open source par exemple les différentes couches. Puis nous avons utilisé la méthode npm dans notre invite de commande : « npm install --save itowns », pour installer la bibliothèque itowns et avoir toutes les dépendances de cette bibliothèque.

III.2.2 Contenu du dossier utilisé

Dans cette partie, nous présenterons les fichiers et dossiers qui nous ont servi à mettre en place notre plateforme.

Le package d'installation contient plusieurs dossiers et fichiers, cependant dans le processus d'installation tous ces dossiers et fichiers ne seront pas utilisés. Seuls les dossiers et fichiers consignés dans le Tableau 1 ont été utilisés :

Tableau 1 : Dossiers et fichiers utiles pour la mise en place de Itowns [source : GBONGBO Irénée]

Fichiers/dossiers	Description
Dossier « src »	Contient les codes sources javascript des fonctions qui peuvent utilisables dans Itowns.
Dossier « exemples »	Contient les scripts HTML, CSS et JS, les objets affichés dans le navigateur, les modules de la bibliothèque Three.js que nous avons utilisés et les couches spatiales.
Fichier package.json	Permet de regrouper les différents scripts utilisés pour webpack.
Fichier webpack.config.js	Fichier de configuration du serveur webpack. Il permet de spécifier le chemin de base des fichiers.

III.2.3 Configuration de l'interface utilisateur

III.2.3.1 Mise en place du « view ».

Le « view » représente en effet le visualiseur, une instance qui représente la scène 3D ou 2D dans laquelle les données géospatiales sont visualisées et manipulées. Dans itowns, la création du « view » est étroitement liée à la création des instances « GlobeView » pour les scènes 3D et « PlanarView » pour les scènes 2D. Pour mettre en place le « GlobeView » nous avons utilisé le code de la Figure 30.

La création du GlobeView nécessite généralement deux paramètres :

- ❖ Un élément HTML contenant le canevas où la vue sera affichée ;
- ❖ Une variable placement qui contient la position géographique (longitude, latitude) de la zone observée sur notre GlobeView et la distance à laquelle l'observateur observe la zone.

```
var viewerDiv = document.getElementById('viewerDiv');
const placement = {
  coord: new itowns.Coordinates('EPSG:4326', 2.351323, 48.856712),
  range: 25000000,
}
var view = new itowns.GlobeView(viewerDiv, placement);
```

Figure 30 : Code pour générer un globe view sur itowns [source : Itowns]

III.2.3.2 Intégration des couches

L'intégration des couches peut se faire de deux manières selon si les données sont disponibles en ligne ou en local et en fonction du type de couche à intégrer. Pour notre part, nous avons téléchargé des données disponibles sur le GitHub de itowns. Nous pouvons utiliser le code de la Figure 32 disponible dans la documentation de itowns pour afficher nos différentes couches disponibles en ligne, dans ce cas il suffira de modifier « url » et le « format » de la couche. Il est également important de préciser la nature de la couche (dans l'exemple de la Figure 32 c'est une couche ColorLayer qui est créée). Il est également possible d'utiliser le code de la Figure 31, si l'on a en sa possession une couche disponible en local. Dans ce cas, il s'agira de mettre le lien de la couche disponible sur notre disque dur ou en local et d'indiquer la nature de la couche créée.

Nous avons utilisé ce code car toutes les couches que nous avons téléchargées sur le GitHub étaient au format «. Json ».

```

itowns.Fetcher.json('./Layers/JSONLayers/Ortho.json').then(function _(config) {
  config.source = new itowns.WMTSSource(config.source);
  view.addLayer(
    new itowns.ColorLayer('Ortho', config),
  ).then(debugMenu.addLayerGUI.bind(debugMenu));
});

```

Figure 31 : Code d'intégration des couches disponibles en local [source :Itowns]

```

// Create a ColorLayer
const color = new ColorLayer('roads', {
  source: new SourceWMTS({
    protocol: 'wmts',
    url: 'http://server.geo/wmts/...',
    format: 'image/png',
    name: 'nameService',
    tileMatrixSet: 'PM',
  }),
  transparent: true,
  opacity: 0.5,
});
// Add the layer
view.addLayer(color);

```

Figure 32 : Code d'intégration des couches disponible en ligne [source : Itowns]

III.3 INTEGRATION DU NUAGE DE POINTS

III.3.1 Types et formats de données

Pour aboutir à notre objectif et mettre en place une chaîne de traitement qui servira de documentation ou de référence à l'entreprise, plusieurs types et formats de données ont été mis à notre disposition. Comme données tests afin de réaliser l'intégration du nuage de points brutes de notre site d'étude Haussmann saint-Lazare qui a été assemblé et exporté au format E56 via le logiciel Cyclone 3D.

Comme données tests, nous avons eu 3 nuages de points. Le premier est un nuage au format « las/laz » dont les coordonnées sont connues dans un repère local. Ce nuage représente le milieu extérieur qu'on a numérisé lors de l'acquisition des données. Le second nuage de points est géoréférencé en RGF93 CC49 et est au format « las/laz ». Ce nuage représente un tunnel souterrain situé à proximité de la tour triangle . Le dernier nuage est identique au second mais à la différence, il a été géoréférencé en WGS84 aux coordonnées géocentriques.

III.3.2 Processus d'intégration

III.3.2.1 Géoréférencement

Le géoréférencement est une étape très importante dans le processus d'intégration des nuages de points dans Itowns. Toutes les données affichées dans Itowns sont préalablement géoréférencées dans un système de coordonnées géodésiques compatibles à Itowns. Selon sa documentation, nativement, itowns prend en charge le système géodésique mondial WGS84 aux coordonnées géocentriques ou géographiques. Il est également possible grâce à la bibliothèque « proj4 » de java script de définir d'autres systèmes de coordonnées.

Concernant nos données tests, nous avons géoréférencé en WGS84 aux coordonnées géocentriques uniquement le premier nuage selon la procédure décrite ci-dessous.

Notre but est donc d'intégrer dans notre SIG3D un nuage de point initialement connu en coordonnées local et géoréférencé en WGS84 aux coordonnées géocentriques, un second nuage initialement connu en WGS84 aux coordonnées géocentriques et enfin intégrer un nuage de point connu en RGF93 CC49 en définissant ce système de coordonnées par la bibliothèque « proj4 » de java script.

III.3.2.2 Procédure de géoréférencement

Grace à cloud compare, le nuage de points géoréférencé en RGF93 CC49 et au format las a été exporté en txt. Le fichier txt comprend l'ensemble des coordonnées géocentriques en RGF93 CC49 et l'ensemble des composantes RGB des points constitutifs du nuage.

Grâce à un code python, nous avons séparé les composantes RGB des coordonnées géocentriques dans deux fichiers txt distincts. Puis nous avons converti en WGS84 géocentrique grâce au logiciel Circé le fichier txt contenant les coordonnées géocentriques en RGF93 CC49 car le logiciel ne reconnaît que les coordonnées des points pas de composantes colométriques (RGB).

Une fois, le fichier txt contenant les coordonnées des points en RGF93 CC49 converti en WGS84 géocentrique, nous avons joint les composantes RGB des différents points par un code python. Enfin, nous avons converti le fichier txt obtenu grâce au code python en format Las via de cloud compare.

Si le nuage de points est en local, il est possible de le géoréférencer dans le système de coordonnées géodésique en WGS 84 géocentrique. A condition d'avoir au moins quatre points de liaisons, c'est-à-dire des points connus en local et en WGS 84 géocentrique. Pour référencer ce type de nuage, nous avons utilisé l'outil « Aligns two clouds by picking » de cloud compare. Si les points de liaisons sont connus en RGF93 CC49, il est possible de géoréférencer le nuage grâce à cloud compare puis suivre le processus de la Figure 33.

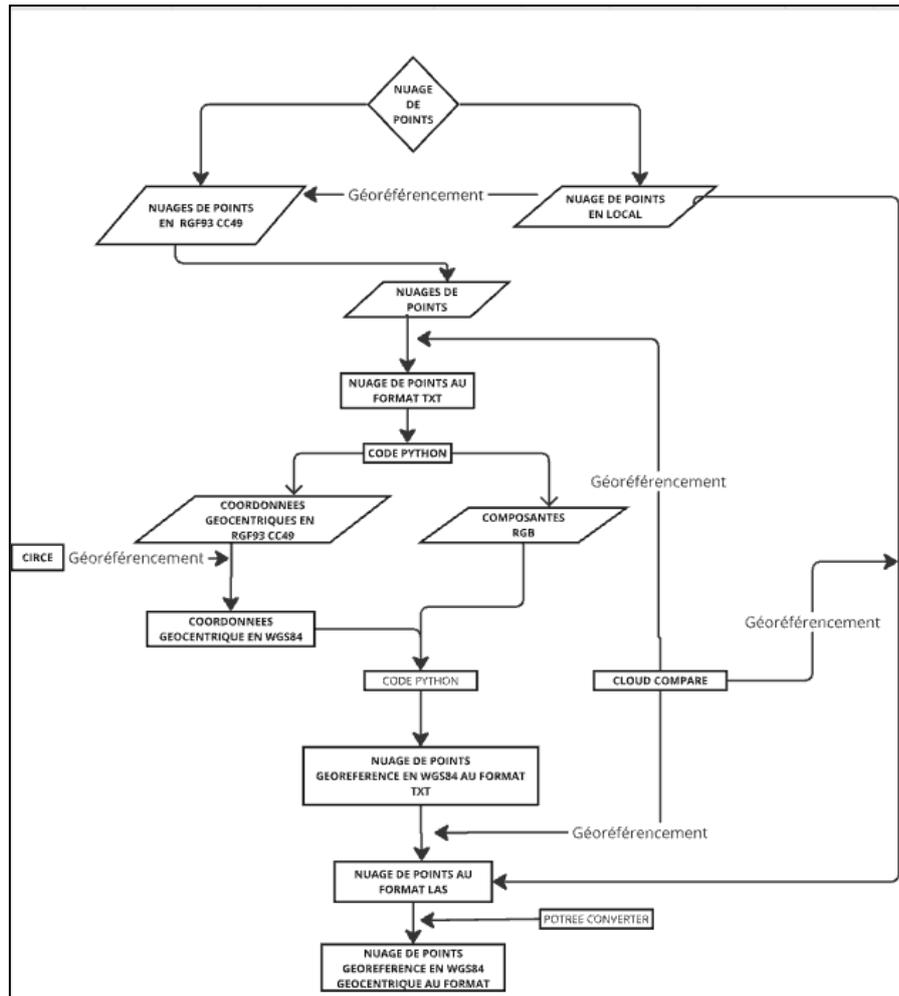


Figure 33 : Etape du géoréférencement

III.3.2.3 Conversion des nuages de points en potree¹⁴

Pour visualiser nos données 3D, il est primordial qu'elles soient dans un format compatible avec Itowns. La conversion de nos nuages de points a été possible grâce à potree Converter. Ce convertisseur permet de convertir des fichiers de format « Laz », « Las », « PTX » et « PLY » au format requis pour être affiché dans Potree (DELSART, 2020). Pour convertir un nuage de points au format potree, il faut télécharger potree Converter via « <https://potree.github.io/> ». Le fichier clouds.js (Figure 35) sera utilisé pour afficher les nuages de points. Les données tests ont été converties au format potree pour une éventuelle intégration. Enfin, il faut lancer le code de la Figure 34 dans l'invite de commande en modifiant « C:/pointcloud.las » par le chemin de votre nuage. Toutes nos données tests ont

¹⁴ Potree : Un moteur de rendu de nuage de points open source et gratuit [source : <https://github.com/potree/potree>]

été converties dans ce format car c'est le format pris en charge par Itowns pour l'intégration des nuages de points.

```
./PotreeConverter.exe C:/pointcloud.las -o C:/xampp/htdocs/potree --generate-page pageName
```

Figure 34 : Code de conversion du nuage de points las en potree [source : potree]

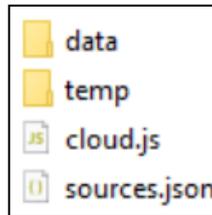


Figure 35 : Contenu du dossier de conversion des nuages de points

III.3.2.4 Résultat et Affichage des données

Pour intégrer les nuages de points dans Itowns, nous avons utilisé le code de la Figure 36. Nous avons en fonction du nuage, modifié le nom « eglise_saint_blaise_arles » par le nom de notre nuage puis modifié « url » et « file ». L'« url » représente le chemin de notre nuage et « file » désigne le nom du nuage suivi de l'extension (« file :cloud.js »).

```
// Configure Point Cloud layer
potreeLayer = new itowns.PotreeLayer('eglise_saint_blaise_arles', {
  source: new itowns.PotreeSource({
    file: 'eglise_saint_blaise_arles.js',
    url: 'https://raw.githubusercontent.com/gmaillet/dataset/master/',
    crs: view.referenceCrs,
  }),
});
```

Figure 36 : Code d'intégration des nuages de points [source : Itowns]

Nous avons pu intégrer dans notre SIG3D le nuage de point initialement connu en coordonnées local et géoréférencé en WGS84 aux coordonnées géocentriques (Figure 38) et celui initialement connu en WGS84 aux coordonnées géocentriques (Figure 37). Nous constatons un décalage au niveau de l'intégration de ces nuages, cela est dû à la précision

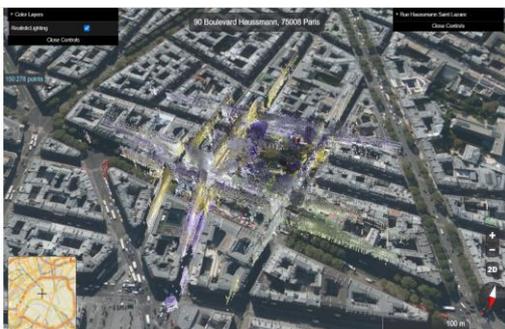


Figure 37 : Intégration du nuage de points de la rue d'Hausmann Saint-Lazare

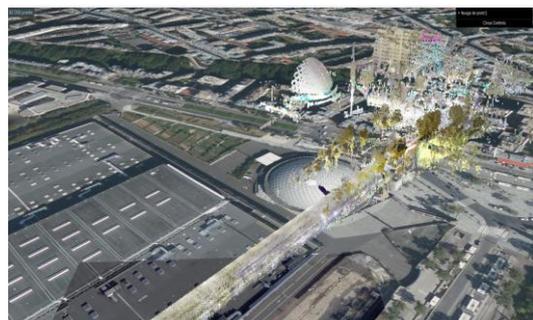


Figure 38 : Intégration du nuage de points du pont situé à proximité de la tour triangle

du géoréférencement. En définissant le système RGF93 CC49 par la bibliothèque « proj4 » de java script, l'intégration du nuage de points connu en RGF93 CC49 a été un échec.

Nous retenons que pour intégrer un nuage de points dans itowns, il faut le géoréférencer en WGS 84. Puis à travers « potree Converter », convertir notre nuage de point dans le format compatible à itowns (potree). Pour géoréférencer un nuage de points local en WGS 84 nous pouvons utiliser « Cloud Compare ». Par contre si le nuage est dans un système de référence connu par exemple RGF93 CC49, le géoréférencement peut se faire avec « Circé ».

III.4 INTEGRATION DE LA VISITE VIRTUELLE

Nous avons deux moyens pour intégrer la visite virtuelle dans notre SIG 3D. La première méthode consiste en une intégration indirecte via la matérialisation des scans ou des scènes constituant la visite virtuelle. La seconde méthode représente une perspective d'amélioration de la première intégration : c'est « l'immersive view » d'itowns qui ne sera pas développée.

III.4.1 Matérialisation des Scans

Itowns utilise la puissance de la librairie Three.js, ce qui permet de créer un objet 3D et de le rendre visible via la vue d'itowns. C'est l'exemple du code source de « Clamp 3D object to ground » dans itowns. Pour intégrer la visite virtuelle dans itowns, nous avons matérialisé les différents scans (réalisés à l'extérieure du tunnel) représentant les scènes de la visite par des cercles 3D créés avec Three.js dans itowns. Ces cercles 3D ne sont pas de simples matérialisations, ils occupent la position approximative des différents scans. Les coordonnées des cercles ont été acquises sur le site de Géoportails.

III.4.2 Lien entre les cercles 3D dans le SIG 3D et les scans de la visite virtuelle extérieure

Nous avons défini une équation de cercle de sorte qu'au clic de l'utilisateur à l'intérieur du cercle un nouvel onglet s'ouvre sur la scène qui correspond au scan ou au cercle 3D dans le SIG3D sur lequel il a cliqué (Figure 39). Nous avons saisi dans un tableau les coordonnées des scans. La position des scans dans le tableau correspond à la position des cercle 3D.

Lorsque l'utilisateur clique sur un cercle 3D dans itowns, (Figure 40) le code js que nous avons écrit récupère la position du cercle 3D et modifie l'url de la visite virtuelle en ajoutant le paramètre « ? numeroscene=position ». Parallèlement, nous avons écrit un code dans le dossier de la visite virtuelle qui récupère la nouvelle « url » grâce à la propriété « window.location.search », puis récupère le paramètre ajouté à url de la visite virtuelle grâce à la commande « new URLSearchParams ». La position est obtenue à l'aide de la propriété « get("numeroscene") ». Enfin grâce à la fonction « Switch » de marzipano, nous affichons dans un nouvel la scène qui correspond au scan ou au cercle 3d dans le SIG3D sur lequel l'utilisateur a cliqué. Nous avons ainsi établi un lien entre le SIG 3D et la visite virtuelle extérieure (Figure 41). Nous avons ajouté à la visite extérieure un bouton qui nous permet d'accéder à la visite du tunnel et inversement.

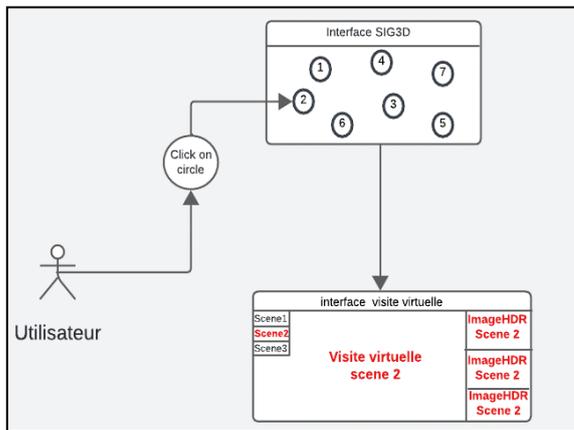


Figure 39 : Principe du lien entre la visite virtuelle et SIG 3D

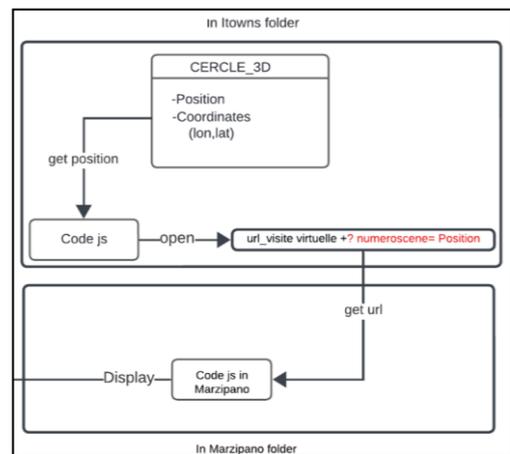


Figure 40 : : Schéma de conception du lien entre la visite virtuelle et le SIG3D

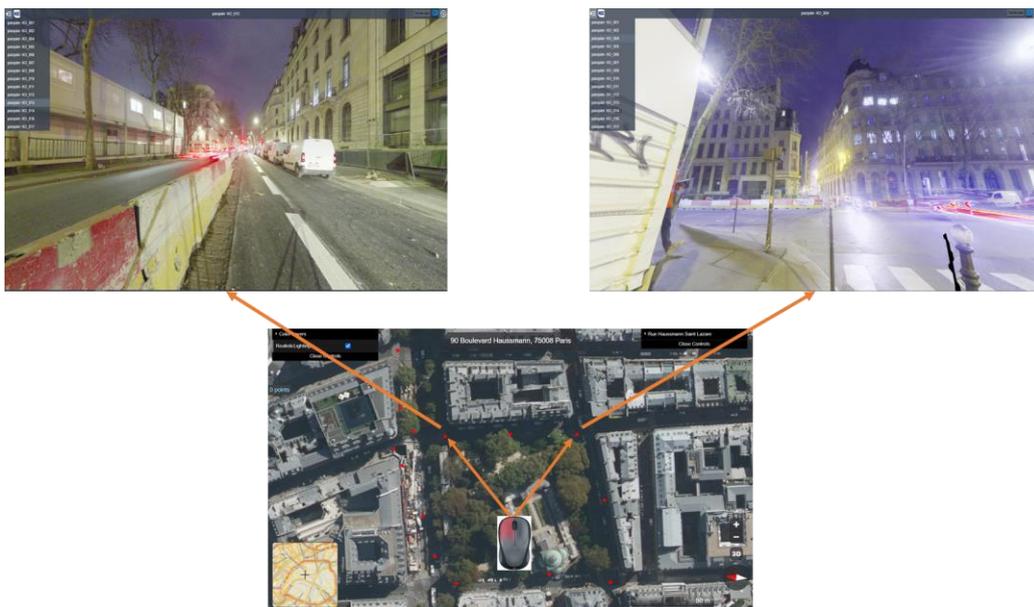


Figure 41 : Lien SIG3D-visite virtuelle

Conclusion

Le virtuel joue un rôle très important dans le suivi des ouvrages d'art, il nous permet de suivre l'état des différents travaux qui sont réalisés dans l'ouvrage c'est-à-dire avoir une vue d'ensemble des travaux réalisés, inachevés ou pas réalisés. Grâce aux outils adéquats, nous pouvons interagir avec ce virtuel afin d'y apporter des informations nécessaires au suivi d'ouvrage et d'obtenir une vue d'ensemble de l'état de notre ouvrage, un rendu objectif.

Ce travail de fin d'études avait pour objectifs de mettre en place deux applications open sources afin de répondre au besoin d'un client par le biais d'un livrable constitué des deux applications et des produits 2D tels que les coupes et les déroulées issus du traitement des nuages de points. La première application est issue de l'outil open source Marzipano servant à réaliser des visites virtuelles à travers des photographies provenant du scanner 3D, elle sera par la suite personnalisée pour un rendu plus objectif. Puis, il a été question de développer un outil permettant d'interagir avec la visite virtuelle par l'ajout des capteurs et de l'intégration de leurs données dans la visite virtuelle. La seconde est un SIG 3D : Itowns, pouvant intégrer les couches, des nuages de points et la visite virtuelle réaliser grâce à marzipano.

Pour réaliser nos objectifs, nous avons d'abord parcouru l'ensemble des ressources scientifiques relatif à notre thématique. Puis il a été question de se saisir des données acquises à l'aide du scanner laser 3D Leica RTC 360 le tunnel Haussmann Saint-Lazare notamment les images panoramiques pour réaliser la visite virtuelle grâce à Marzipano. Dans l'optique de la personnalisation nous avons ajouté des photos HD à la visite virtuelle pour un rendu plus objectif et nous avons mis en place une application open source servant à réaliser des actions de zoom afin de visualiser les détails non perceptibles dans la visite virtuelle.

Ensuite, pour le suivi de l'ouvrage, nous avons développé un outil qui permet d'interagir avec la visite virtuelle en y ajoutant des hotspots pouvant intégrer les informations (information textuelles, fichiers de tous les formats) des capteurs. De plus, nous avons assemblé les nuages de points pour avoir un nuage d'ensemble, nous les avons nettoyés pour avoir un nuage propre et décimé pour un nuage léger et facile à utiliser.

Grâce à cloud compare nous avons utilisé le nuage décimé pour réaliser les produits 2D du client (NGE) : Coupes et déroulés.

Enfin nous avons mis en place le SIG 3D Itowns à l'aide de sa documentation détaillée. Par ailleurs, nous y avons intégré des couches de fond comme des MNT, grâce aux données tests mises à notre disposition nous avons déduit une chaîne de traitement permettant d'intégrer des nuages de points dans Itowns. Nous avons couplé la visite virtuelle au SIG3D en établissant un lien entre les scans qui ont été matérialisés par des cercles 3D dans le SIG et les scènes de la visite virtuelle.

Le livrable, accessible via la plateforme Datatys a fait l'objet d'une présentation et d'une validation partielle de la part du client. Toutefois, le client a émis une suggestion afin d'améliorer le rendu de la visite virtuelle. Il souhaiterait qu'on puisse ajouter dans la visite virtuelle un moyen de rendre visible ou pas certains hotspots cette suggestion représente un moyen de filtrage des hotspots en fonctions de certains critères.

L'entreprise Socotec Monitoring France disposait principalement d'une plateforme de visualisation de donnée 2D. Par ce travail, nous mettons à sa disposition deux autres plateformes permettant de visualiser les données 3D. Concernant le SIG 3D, nous mettons à la disposition de l'entreprise une chaîne de traitement permettant d'intégrer les nuages de points. Quant aux outils développés ou mis en place pour la visite virtuelle, nous mettons à la disposition de l'entreprise une chaîne de traitement permettant de les réutiliser sur de nouvelles données.

Pour finir, il serait premièrement intéressant d'améliorer l'interface graphique de l'outil d'intégration de capteurs par l'utilisation des technologies comme React.js. Comme le principe des jumeaux numériques, il serait également intéressant de mettre à jour de manière automatique les informations liées aux hotspots déjà intégrés et de rajouter une option de suppression. Les maquettes BIM sont aujourd'hui d'actualité, le SIG 3D peut être amélioré afin d'intégrer les maquettes BIM. « L'immersive view » d'itowns est un moyen pour coupler une visite virtuelle à un SIG 3D, cependant est-il possible dans cette optique d'intégrer des capteurs possédant des données dans notre SIG 3D ?

Bibliographie

Chapitre dans un ouvrage imprimé

ANDRY Tiffany, KIEFFER Suzanne, LAMBOTTE François. Les fondements de la visualisation d'information. Dans ANDRY Tiffany, KIEFFER Suzanne, LAMBOTTE François (éd.), Les fondamentaux de la visualisation de données. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, « INFO&COM », 2022, p. 13-34. Disponible sur : <<https://www.cairn.info/les-fondamentaux-de-la-visualisation-de-donnees--9782807341579-page-13.htm>> (Consulté 13/07/2024).

Travaux universitaires

Andry Tiffany, 2021. Beauté des données : quelle est l'influence de l'ornementation des visualisations de données sur la construction de sens de l'utilisateur, [en ligne]. Dissertation (thèse) doctorale pour l'obtention du grade de Docteur en sciences de l'information et de la communication, Université Catholique de Louvain, 308p. Disponible sur : <<http://hdl.handle.net/2078.1/244129>>. (Consulté 13/07/2024).

Elise Lachat, 2019. Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine, [en ligne]. Thèse doctorale pour l'obtention du grade de Docteur en topographie-géomatique, Université de Strasbourg, 289p. Disponible sur : <<https://theses.hal.science/tel-02374000>>. (Consulté 13/07/2024).

Maxime Marchand, 2018. Optimisation du traitement de nuage de points pour la production de plans de façade au sein d'un cabinet de géomètre-expert, [en ligne]. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur cnam, ESGT, 81p. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02093629>>. (Consulté 13/07/2024).

Delsart Benjamin, 2020. Segmentation manuelle de nuage de points au sein d'un système d'information géographique web 3D, [en ligne]. Mémoire pour l'obtention du titre de master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrie, Université de Liège, 107p. Disponible sur : <<http://hdl.handle.net/2268.2/9143>>. (Consulté 13/07/2024).

Irenne GBONGBO, 2021. Vers une intégration BIM-IOT-SIG 3D pour le suivi des ouvrages d'art [en ligne]. Mémoire pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur CNAM, ESGT, 65p. Disponible sur : < <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03545801>>(Consulté 13/07/2024).

DE CARVALHO MATOSINHOS, 2019. Intégration de la 3D sur un site Web grâce à WebGL,[en ligne]. Travail de Bachelor pour l'obtention du Bachelor HES, 79p. Disponible sur :< <https://sonar.rero.ch/hesso/documents/314791>> (Consulté 13/07/2024).

BENNI, 2018. Adapter la réalité de terrain en SIG 3D : les problématiques du géomètre dans le processus BIM, [en ligne]. Mémoire pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur CNAM, ESGT, 111p. Disponible sur :< <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01685629>> (Consulté 13/07/2024).

Articles de périodiques électroniques

Landes Tania & Grussenmeyer Pierre (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammetrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie1/2) . *Revue XYZ* [en ligne]. **Volume 128**. 37-49. Disponible sur :
<https://www.researchgate.net/publication/285288252_Les_principes_fondamentaux_de_la_lasergrammetrie_terrestre_sytemes_et_caracteristiques> (Consulté 13/07/2024).

T. Landes, H. Boulaassal, P. Grussenmeyer, (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammetrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie2/2) [en ligne]. *Revue XYZ*, **Volume 129**, 25-38. Disponible sur :
<https://www.researchgate.net/publication/285288252_Les_principes_fondamentaux_de_la_lasergrammetrie_terrestre_sytemes_et_caracteristiques> (Consulté 13/07/2024).

Grilli, E., Menna, F. and Remondino, F, (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms [en ligne]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 339-344. Disponible sur : <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W3/339/2017/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017-metrics.html>> (Consulté 13/07/2024).

Sites web

Socotec Monitoring France. Datatys : une plateforme unique de visualisation de données, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.socotec.fr/le-blog/datatys-visualisation-donnees>>. (Consulté le 12/07/2024)

Hauts-de-Seine. Eole le prolongement du RER E, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.hauts-de-seine.fr/mon-departement/les-hauts-de-seine/les-grands-projets/les-infrastructures-de-transport/metros-et-rer/eole-le-prolongement-du-rer-e#:~:text=Nanterre%20mi%202023,-.Le%20projet%20de%20prolongement%20du%20RER%20E%20%C3%A0%20l'ouest,'%C3%A0%20Mantes%20la%20Jolie>>. (Consulté le 12/07/2024)

Leica Geosystems. Scanner Laser 3D Leica RTC360 : Leica RTC360 Solution de capture de la réalité 3D, [en ligne]. Disponible sur : <<https://leica-geosystems.com/fr-ma/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>>. (Consulté le 12/07/2024)

Theta360.guide. 360° Image Viewers for Web Developers For building virtual tours or embedding in your app, [en ligne] Disponible sur : <<https://www2.theta360.guide/doc/article/11>>. (Consulté le 12/07/2024)

Clubic. Google rachète Digisfera pour optimiser Street View [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.clubic.com/internet/univers-google/google-maps/actualite-783202-google-digisfera-optimiser-street-view.html>> . (Consulté le 12/07/2024)

Tiiny.host . What is Marzipano? | Here is a Complete Guide [en ligne]. Disponible sur : <<https://tiiny.host/blog/what-is-marzipano-tool-here-is-a-complete-astonishing-guide/>>. (Consulté le 12/07/2024)

VentureBeat. Google acquires 360-degree photography startup Digisfera to beef up Street View, [en ligne]. Disponible sur : <<https://venturebeat.com/media/google-acquires-360-degree-photography-startup-digisfera-to-beef-up-street-view/>>. (Consulté le 12/07/2024)

Turbofuture. 5 Best JavaScript Image Zoom Libraries to Check Out: The Ultimate List,[en ligne]. Disponible sur : <<https://turbofuture.com/computers/JavaScript-Image-Zoom>> (Consulté le 12/07/2024)

GitHub. Zoomist [en ligne]. Disponible sur : < <https://github.com/cotton123236/zoomist>>
(Consulté le 12/07/2024)

GitHub. Itowns [en ligne]. Disponible sur : <<https://github.com/iTowns/itowns/>> (Consulté le 12/07/2024)

GitHub. Marzipano [en ligne]. Disponible sur : <<https://github.com/google/marzipano>>
(Consulté le 12/07/2024)

Site web. Itowns [en ligne]. Disponible sur :< <https://www.itowns-project.org/>>(Consulté le 12/07/2024)

Site web. Marzipano [en ligne]. Disponible sur :< <https://www.marzipano.net/>> (Consulté le 12/07/2024)

Codingame. Manipulation d'image, [en ligne]. Disponible sur :
<<https://www.codingame.com/playgrounds/56931/les-bases-de-python-pour-le-lycee/3--manipulations-dimages-suite>> (Consulté le 12/07/2024)

Site web.CloudCompare [en ligne].Disponible sur < [Rasterize - CloudCompareWiki](#)>
(Consulté le 12/07/2024)

Liste des Figures

Figure 1 : Tilt log	9
Figure 2 : Piézomètre	9
Figure 3 : Airlog outdoor	9
Figure 4 : Graphe de déplacements suivant les directions X, Y et Z et présence des seuils de sécurités (en rouge) sur Datatys.....	10
Figure 5 : Plan du prolongement du RER E de Saint-Lazare à Mantes-la-Jolie	12
Figure 7 : scanner laser 3D Leica RTC 360	14
Figure 6 : Appareil photo SONY Alpha 7R V	14
Figure 8 : Plan 2D du tunnel	14
Figure 9:Structure de base de Marzipano.....	16
Figure 10 : Structure de base de Three.js.....	17
Figure 11 : Approches comparées de géoréférencement direct et indirect dans le cas d'un levé par scanner laser terrestre	18
Figure 12 : Les étapes de la réalisation d'une visite virtuelle dans Marzipano.....	21
Figure 13 : Aperçu de la visite virtuelle du tunnel	22
Figure 14 : Schéma du concept de l'intégration des images HD dans la visite virtuelle	23
Figure 15 : Aperçu de l'intégration des images HD à droite de l'interface de la visite virtuelle.....	23
Figure 16 : Code js pour initialiser le zoom].....	24
Figure 17 : Code html indispensable pour l'affichage des images.....	24
Figure 18 : Intégration d'une image HD dans l'application Zoomist	25
Figure 20 : Intégration d'un link -hotspot pendant la phase de réalisation de la visite virtuelle.....	25
Figure 19 : Intégration d'un hotspot pendant la phase de réalisation de la visite virtuelle	25
Figure 21 : Schéma de la conception de l'outil d'intégration des capteurs	27
Figure 22 : Interface de l'outil d'intégration des capteurs	27
Figure 23 : Intégration d'un hotspot à travers l'outil	28
Figure 24: Aperçu de l'ajout du hotspot et de ses données	28
Figure 25:Aperçu du nuage de point décimé du tunnel sur potree.....	29
Figure 26 : Coupe traversable de la section J de la figure ci-contre.....	30
Figure 27 : Division du plan du tunnel par variation de diamètre.....	30
Figure 28 : Coupe longitudinale du tunnel.....	30
Figure 29 : Aperçu d'une section du nuage de point rastérisée.....	30
Figure 30 : Code pour générer un globe view sur itowns	32
Figure 31 : Code d'intégration des couches disponibles en local	33
Figure 32 : Code d'intégration des couches disponible en ligne.....	33
Figure 33 : Etape du géoréférencement.....	35
Figure 34 : Code de conversion du nuage de points las en potree	36
Figure 35 : Contenu du dossier de conversion des nuages de points	36
Figure 36 : Code d'intégration des nuages de points	36
Figure 38 : Intégration du nuage de points de la rue d'Hausmann Saint-Lazare.....	36
Figure 37 : Intégration du nuage de points du pont situé à proximité de la tour triangle.....	36
Figure 39 : Principe du lien entre la visite virtuelle et SIG 3D	38
Figure 40 : : Schéma de conception du lien entre la visite virtuelle et le SIG3D	38
Figure 41 : Lien SIG3D-visite virtuelle	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dossiers et fichiers utiles pour la mise en place de Itowns	31
---	----

Réalisation d'une visite virtuelle couplée avec un SIG3D et intégrant des données de capteurs pour le suivi d'ouvrage d'art

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

Le projet Eole, est un projet consistant à prolonger la ligne du RER E vers l'ouest. L'extension de la ligne entrainera la construction de nouvelles gares et d'un tunnel dit de « l'entonnement » à Haussmann Saint-Lazare. Plusieurs travaux ont été réalisés dans le tunnel. Intervenant dans ce projet en tant que sous-traitant pour réaliser une auscultation du tunnel et un scan 3D. Socotec Monitoring propose une solution basée sur les outils open sources Itowns et Marzipano pour le suivi de l'ouvrage.

Ce projet consiste d'abord, à réaliser une visite virtuelle grâce à Marzipano à partir des images panoramiques du scan. Puis à développer un outil pour intégrer les données des capteurs et les données du client dans la visite virtuelle. Ensuite Il a pour but de traiter les nuages de points issus du scan 3D afin de fournir un livrable au client. Enfin, il sera question de mettre en place un SIG 3D basé sur Itowns qui intègre les couches, les nuages de points et la visite virtuelle.

Mots clés: Scan 3D, open sources, Itowns, Marzipano, suivi d'ouvrage, visite virtuelle, SIG 3D, nuage de points, capteurs

SUMMARY

The Eole project involves extending the RER E line westwards. The extension of the line will entail the construction of new stations and a tunnel known as the « entonnement » at Haussmann Saint-Lazare. A number of works have been carried out in the tunnel. Socotec Monitoring is involved in this project as a subcontractor for tunnel inspection and 3D scanning. Socotec Monitoring is offering a solution based on the open source tools Itowns and Marzipano for monitoring the structure.

This project consists firstly of carrying out a virtual visit using Marzipano, based on the panoramic images from the scan. Then developing a tool to integrate the sensor data and the client's data into the virtual tour. Next, the aim is to process the point clouds from the 3D scan in order to provide the customer with a deliverable. Finally, we will set up a 3D GIS based on Itowns that integrates the layers, the point clouds and the virtual tour.

Key words: 3D scan, open sources, Itowns, Marzipano, work monitoring, virtual visit, 3D GIS, point cloud, sensors