



HAL
open science

Étude des processus d'acquisition et de traitement de données acquises par aéronef léger pour les travaux d'inspection de la SNCF

Leilä Bakkouch

► **To cite this version:**

Leilä Bakkouch. Étude des processus d'acquisition et de traitement de données acquises par aéronef léger pour les travaux d'inspection de la SNCF. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00873121

HAL Id: dumas-00873121

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00873121v1>

Submitted on 22 Oct 2013

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
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

Spécialité : **Géomètre - Topographe**

par

Leïla BAKKOUCH

ÉTUDE DES PROCESSUS D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DE DONNÉES
ACQUISES PAR AÉRONEF LEGER POUR LES TRAVAUX D'INSPECTION DE LA SNCF
Application aux ouvrages rocheux

Soutenu le 13 septembre 2013

JURY

PRÉSIDENT : Mme Corina IOVAN, maître de conférences

MEMBRES : M. Flavien VIGUIER, maître de stage
M. José CALI, professeur référent
M. Guillaume TOUYA, maître de stage
M. Vincent HABCHI, enseignant à l'ESGT

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Monsieur Bruno LANDES, chef de la Division **ATT**, pour m'avoir accueillie au sein de sa division.

Je tiens à remercier Flavien VIGUIER, mon maître de stage, pour ses conseils et son aide avisés durant toutes mes recherches. Il m'a fait confiance tout au long du projet en me laissant gérer l'organisation de mon Travail de Fin d'Études de manière autonome tout en m'apportant un regard extérieur.

Je voudrais également remercier Patrick MANANT, Pierre ASSALI (doctorant), Laurent HEDIN (chef de section), Pierre LASSEUR (chef de section et ancien E.S.G.T), Guillaume VIVENT, Grégoire GOUSSU et Antoine GOZE (étudiant en stage de fin d'études) pour leur aide et leur soutien lors de l'organisation et de la réalisation des chantiers.

Pour la division **OTH**, je souhaite remercier chaleureusement Nicolas POLLET et Carole GIRIER BICHON pour m'avoir orientée sur les différentes pistes de parois rocheuses existantes et sur les différents aspects du métier de géologue.

Je remercie Camille LEVAVASSEUR, géologue au pôle régional d'Ingénierie SNCF de Marseille, pour tous les renseignements sur la paroi rocheuse étudiée.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble de la division **ATT**, pour son accueil et son expérience du monde ferroviaire, plus particulièrement Delphine ZINNIGER (ancienne E.S.G.T) et Benjamin GAUDIN.

Merci à toute ma famille et à mes amis pour leur aide et leur soutien pendant mes études. Merci à Marie GROB pour son aide précieuse dans la phase de relecture.

Pour terminer je remercie l'ensemble du corps enseignant de l'E.S.G.T. pour m'avoir fourni les bases théoriques et pratiques qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement à Monsieur José CALI, professeur référent, qui a su orienter mes recherches et me conforter dans mes choix et études.

Liste des abréviations

- A- **ATT** : Assistance Travaux et Topographie
- C- **CED** : Corrélation Épipolaire Dense
- D- **DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile
DNC : Déclaration de Niveau de Compétence
- L- **LVE** : Lignes Voie et Environnement
- M- **MAP** : Manuel d'Activités Particulières
- N- **N.B** : Nota Bene
- O- **OAb** : Orientation Absolue
OAr : Ouvrages d'Art
OR : Orientation Relative
OT : Ouvrages en Terre
OTH : Ouvrages en Terre et Hydraulique
- P- **PK** : Point Kilométrique
PM : Point Métrique
PN : Passage à Niveau
- R- **RFF** : Réseau Ferré de France
RFN : Réseau Ferré National
- S- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de Fer
- T- **TFE** : Travail de Fin d'Études
- U- **UAV** : Unmanned Aerial Vehicle

Glossaire

Aérotriangulation : Étape de photogrammétrie qui vise à déterminer, pour chaque photo, la position exacte de la caméra au moment de la prise de vues aériennes. À l'aide de cette position, on pourra déterminer l'orientation des images, créer des modèles stéréoscopiques et lire correctement les coordonnées indiquées dans les modèles. [*@IGN*, vu juillet 2013]

Artefact : Structure ou phénomène d'origine artificielle ou accidentelle qui altère une expérience ou un examen portant sur un phénomène naturel. [Dictionnaire Larousse]

Charge utile : charge pouvant être embarquée par le drone.

Image stéréoscopique : elle est réalisée à partir de deux capteurs optiques (ex : appareil photo) photographiant une même scène à partir de deux points de vue différents.

Exif : Exchangeable image file format (norme d'échange de données pour les fichiers d'images). Ce sont les métadonnées d'un appareil photo numérique qui comprennent les informations suivantes : taille, résolution, modèle de l'appareil, droit d'auteur, focale, etc.

PK : Point kilométrique sur une voie qui permet d'identifier précisément notre position en coordonnées ferrolocalisées (Ligne, Voie, PK).

OAb : Dans un appareil de restitution photogrammétrique, ultime opération du calage d'un couple, comportant son basculement (orientation des verticales du modèle) et sa mise en concordance avec la stéréominute (orientation des horizontales du modèle) par déplacement de celle-ci sur le coordinatographe. Cette opération exige la connaissance d'un certain nombre de points de calage, au minimum deux en planimétrie et trois en altimétrie. [*@aft*, vu juillet 2013a]

OR : En photogrammétrie, lors de la mise en place d'un couple stéréoscopique, opération qui consiste à déterminer les orientations relatives des deux faisceaux perspectifs, telles que tous les rayons homologues se coupent. Elle fait intervenir cinq paramètres qui sont déduits de la mesure des parallaxes en des points judicieusement choisis dans les stéréomodèle. [*@aft*, vu juillet 2013b]

Télépilote : personne qui manœuvre l'aéronef.

UAV : Unmanned Aerial Vehicle pour sa définition anglaise plus communément appelé en France drone sans pilote à bord.

V1 et V2 : Nom de chaque voie présente sur le Réseau Ferré National (RFN). Sur le réseau ferré, les lignes peuvent être constituées d'une seule voie (lignes à voie unique) ou de deux voies V1 et V2 (lignes à doubles voies).

Vertex : Nom donné dans le logiciel Leica Cyclone aux points et cibles visés lors de la réalisation des levés lasergrammétriques.

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations	3
Glossaire.....	4
Table des matières.....	5
1 Introduction	8
2 Caractéristiques des parois rocheuses et les techniques de levé.....	10
2.1 Risques des ouvrages rocheux sur le réseau ferroviaire.....	10
2.2 Les techniques de levé actuelles.....	11
2.2.1 La lasergrammétrie : le matériel.....	11
2.2.2 Photogrammétrie terrestre.....	12
2.2.2.1 Définition	12
2.2.2.2 Matériel photographique	13
2.3 La nouvelle perspective du drone.....	14
2.3.1 Historique.....	14
2.3.2 Les innovations.....	14
2.3.3 Champs d'application	15
2.3.4 Les différents modèles de drones.....	15
2.3.4.1 Voilure fixe.....	15
2.3.4.2 Voilure tournante	16
2.3.4.3 Ballons	17
2.3.5 Les limites physiques et applicatives de ce matériel.....	18
2.3.6 Description du drone de la SNCF.....	19
2.3.6.1 La structure.....	19
2.3.6.2 Le logiciel.....	21
2.3.7 La législation pour les aéronefs légers.....	23
2.3.7.1 Objectifs de la loi	23
2.3.7.2 Synthèse.....	23
2.3.8 Préparation des chantiers : Documents administratifs.....	24
2.3.8.1 MAP (Manuel d'Activités Particulières) et autorisations spéciales.....	24
2.3.8.2 DNC (Déclaration de Niveau de Compétence).....	25
2.4 Conclusion	25
3 Levé d'une paroi rocheuse et traitement - <i>application de la méthode drone</i>	26
3.1 Localisation du chantier	26
3.2 Objectif de l'opération	26
3.3 Caractéristiques de la zone 34	26
3.3.1 Particularités de la voie	26
3.3.2 Particularités des parois rocheuses.....	27

3.3.2.1	<i>Côté V1</i>	27
3.3.2.2	<i>Côté V2</i>	27
3.4	Acquisition et traitements par les méthodes actuelles	28
3.4.1	<i>Levé au scanner laser</i>	28
3.4.1.1	<i>Le principe de levé</i>	28
3.4.1.2	<i>Traitement</i>	28
3.4.1.3	<i>Création d'un Truview</i>	30
3.4.1.4	<i>Les contraintes</i>	30
3.4.2	<i>Photogrammétrie terrestre</i>	31
3.4.2.1	<i>Protocole de levé</i>	31
3.4.2.2	<i>Création du nuage de points</i>	32
3.4.2.3	<i>Contraintes</i>	32
3.5	Photogrammétrie aérienne (Drone)	33
3.5.1	<i>Méthodologie de levé</i>	33
3.5.1.1	<i>Plan de vol</i>	33
3.5.1.2	<i>Prise des photos</i>	34
3.5.2	<i>Qualité des images</i>	34
3.5.3	<i>Modélisation du nuage</i>	35
3.5.4	<i>Contraintes</i>	36
3.6	Conclusion	36
4	Comparaisons et analyses	37
4.1	Comparaison qualitative (précision) et complétude	37
4.1.1	<i>Choix du nuage étalon</i>	37
4.1.2	<i>Manipulation préalable</i>	37
4.1.3	<i>Qualité des nuages</i>	37
4.1.4	<i>Erreur de référencement</i>	39
4.1.5	<i>Différence de surface</i>	40
4.1.6	<i>Qualité par rapport à l'orientation de la caméra</i>	42
4.1.7	<i>Comparaison de profils</i>	42
4.1.7.1	<i>Cas de la voie V1</i>	43
4.1.7.2	<i>Cas de la voie V2</i>	45
4.1.8	<i>Comparaison d'un point de vue géologique</i>	48
4.1.8.1	<i>Traitement des nuages</i>	48
4.1.8.2	<i>Analyse géostructurale</i>	49
4.1.9	<i>Conclusion</i>	51
4.2	Analyse technico-économique	52
4.2.1	<i>Phase d'acquisition</i>	52
4.2.2	<i>Coût de déplacements</i>	52
4.2.3	<i>Traitement</i>	53
4.2.4	<i>Coût d'amortissement</i>	54

4.2.4.1	Matériels.....	54
4.2.4.2	Logiciels	54
4.2.5	Coût de la solution de confortement	55
4.2.6	Sécurité des agents et matériels	55
4.2.7	Conclusion	55
4.3	Conclusion	56
5	Conclusion et perspective	57
	Bibliographie	59
	Résumé	63
	Table des illustrations	67
	Liste des tableaux	69
	Table des annexes.....	70
	Synthèse.....	93
	Abstract.....	93

1 Introduction

Ce travail de fin d'études (TFE) a été effectué au sein de la Direction Projets Système Ingénierie (PSIG) de la SNCF localisée à La Plaine Saint-Denis (93). Cette entité est composée de plusieurs départements techniques (Télécommunication, Ouvrage d'Art, Traction Électrique, ...) qui sont eux-mêmes composés de plusieurs divisions. Ce projet a été réalisé dans le département Lignes Voies Environnement (LVE) et plus particulièrement au sein de la division Assistance Travaux et Topographie (ATT), en collaboration avec la division Ouvrages en Terre et Hydraulique (OTH).

La division ATT est formée par quatre groupes. Le premier est la section parcellaire qui se concentre sur les études foncières, pour le compte de RFF (Réseau Ferré de France) et de SNCF, menées dans le cadre de la création de nouvelles lignes. Le deuxième est la section assistance à maîtrise d'œuvre travaux qui s'occupe du suivi des chantiers et des travaux de terrassement. Enfin, les deux dernières, les sections topographie et géomatique réalisent tous types d'opérations topographiques (auscultations, levés topographiques, mesures lasergrammétriques, ...). Cette division est l'un des piliers du département LVE. En effet, la division ATT fournit l'ensemble des données topographiques permettant d'analyser l'état des infrastructures ferroviaires (voies, parois rocheuses, ouvrages d'art, ...). Ces informations sont ensuite traitées (plans, nuages de points, plans de coupes) par les spécialistes métiers du département (OTH par exemple pour les études sur les parois rocheuses).

La division OTH a pour objectif d'évaluer les risques causés par la présence des ouvrages en terre et hydrauliques situés le long des voies. Ces évaluations servent entre autres à dimensionner les dispositifs de sécurité (confortements pour les parois rocheuses et construction d'ouvrages hydrauliques) permettant d'assurer la sécurité des infrastructures et des circulations. Les acquisitions lasergrammétriques et photogrammétriques sont menées par la division ATT afin de disposer d'un plan des parois. Avec les évolutions technologiques en photogrammétrie de nouveaux procédés peuvent voir le jour.

L'essor des méthodes photogrammétriques de corrélation dense d'images offre de nouvelles possibilités techniques pour la réalisation des opérations de mesures topographiques. En effet, cette évolution propose une alternative intéressante et économique pour la création de nuages de points 3D denses.

À ce jour, la majorité des relevés est effectuée par lasergrammétrie et photogrammétrie terrestre et aéroportée. Néanmoins, les méthodes de mesure aéroportées, en raison de leur coût, sont très voire trop rarement utilisées.

L'arrivée du drone ouvre de nouvelles perspectives dans la réalisation de mesures photogrammétriques aériennes. En effet, cet outil léger, pouvant être de type avion ou hélicoptère, permet de nombreuses opérations de mesures par vol stationnaire ou vol linéaire. Cette polyvalence représente un point fort pour l'auscultation de parois rocheuses.

Mon travail de fin d'études s'est donc concentré sur l'évaluation de ce nouveau procédé d'auscultation photogrammétrique (à l'aide de drones) sur les parois rocheuses de la SNCF. Cette évaluation sera réalisée en comparant l'auscultation par drone avec les techniques déjà existantes pour une étude quantitative et qualitative.

Cette nouvelle technique a pour but d'aider les géologues dans leurs études de confortement des parois rocheuses. Leurs méthodes actuelles de levé sont longues (plusieurs journées pour des parois de plusieurs centaines de mètres de long) et fastidieuses (nécessité d'accéder directement à la paroi) et se résument à la réalisation de mesures à la boussole et au clisimètre sur la paroi. De plus,

ces méthodes, non exhaustives, sont souvent à l'origine d'une mauvaise estimation des confortements à réaliser impliquant des surcoûts de réalisation.

L'outil « drone » est non seulement utilisable pour les mesures de parois rocheuses, mais pourrait également permettre la réalisation d'opérations de surveillance des voies ou encore effectuer des contrôles réguliers des installations pour éviter ou limiter les vols de câbles qui sont à l'origine de la majorité des retards de trains et peuvent poser de graves problèmes de sécurité de circulation.

L'objectif de mon **TFE** est donc d'étudier l'intégration des levés photogrammétriques par drone pour les opérations de surveillance et d'auscultation des infrastructures ferroviaires. Cette étude se concentrera sur les méthodes de mesure à mettre en œuvre ainsi que sur les résultats que l'on peut obtenir dans les différents cas de figure. Je devrai donc :

- Lister les travaux photogrammétriques aériens par drone réalisés à ce jour;
- Énumérer les contraintes de cette nouvelle méthode ;
- Étudier la précision de la mesure photogrammétrique par drone ;

Pour cela, l'ensemble des études a été réalisé sur une paroi rocheuse située dans le département du VAR (83) au niveau de la gare de Le Trayas à 20 km de Cannes et Saint Raphaël. Les étapes pour la réalisation des acquisitions sont énumérées dans le plan du mémoire.

Mon mémoire est constitué de trois parties.

Dans un premier temps, nous allons énoncer le contexte et les enjeux de ce projet pour le réseau SNCF, ainsi que les techniques actuelles. Cette partie traitera plus en détails les perspectives qu'offre le drone (selon les différents modèles), la législation existante ainsi que les méthodes d'auscultation envisageables.

Dans un second temps, nous nous attarderons sur le lieu du chantier, l'acquisition des données et leur traitement.

Pour terminer nous ferons les analyses qualitative et quantitative de cette nouvelle méthode en la comparant aux opérations réalisées à ce jour. Enfin, une analyse technico-financière sera menée afin d'étudier la pertinence « économique » de cette méthode.

2 Caractéristiques des parois rocheuses et les techniques de levé

2.1 Risques des ouvrages rocheux sur le réseau ferroviaire

Le Réseau Ferré National (RFN) comprend plus de 31 000 km de voies ferrées. Il est composé de deux types d'ouvrages :

- *Les Ouvrages en Terre (OT)* : ouvrages établis à partir de travaux de terrassement pour la réalisation d'une voie ferrée (déblais, remblais, tranchées rocheuses, digues, etc.).
- *Les Ouvrages d'Art (OAr)* : constructions permettant de franchir des obstacles naturels comme des cours d'eau ou montagnes (ponts, viaducs, tunnels...etc.).

On recense plus de 100 000 ouvrages sur le Réseau Ferré National. Parmi eux 8 000 font l'objet d'une surveillance aux risques potentiels induits par la qualité et le type de matériaux constitutifs des OAr.

L'ouvrage « *Caractérisation des massifs rocheux utile à la réalisation des ouvrages souterrains* » de l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain nous renseigne sur la description des massifs rocheux et leur utilité dans la phase de construction d'un ouvrage, [AFTES, 2003]. Un massif rocheux est composé de différents matériaux hétérogènes et fissurés. Cet ensemble forme une matrice rocheuse. Les éléments les plus importants pour une analyse géostructurale sont les caractéristiques des discontinuités. D'après [AFTES, 2003] la définition d'une discontinuité est *une surface qui interrompt physiquement la continuité de la matrice rocheuse et de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques. Cette surface est en général assimilable, sur une certaine étendue, à un plan et sa résistance à la traction est souvent faible, voire nulle.*

Ces discontinuités créent des failles pouvant générer des chutes de blocs rocheux qui entraînent des perturbations sur le réseau. Plusieurs cas sont recensés (voir l'illustration 2.1).



Illustration 2.1 - Chute de blocs sur les voies ferrées - Source : SNCF

Pour prévenir ou résoudre ces problèmes deux solutions ont été établies : les parades actives et passives. Les parades passives ont pour but de stopper les éboulements de roches pour qu'elles n'atteignent pas la plate-forme ferroviaire. Ce type de parade n'est pas directement en contact avec la paroi d'où son nom de « passive ». Il en existe plusieurs : filets protecteurs, grillages pendus, déviateurs, échelles de perroquet, etc.

Les parades actives ont pour objectif la suppression quasi-totale du risque de chute. Elles se décomposent en trois catégories :

- *Les purges* : retrait, suppression d'une ou des parties dangereuses par explosifs, pelles mécanique, etc.
- *Les abattages* : le nettoyage de la paroi de toute végétation.
- *Les confortements* : ancrages, contreforts, amarrages, filets ou grillages plaqués ancrés, béton projeté...etc.

L'illustration 2.2 montre quelques exemples de parades passives et actives.



Illustration 2.2 - Exemples de parades actives et passives.
De gauche à droite : grillage plaqué ancré, écran gabions et un filet détecteur - Source : SNCF

Le dimensionnement de ces confortements se fait à l'aide d'un plan topographique de la paroi qui est lui-même obtenu par différentes méthodes d'acquisition.

2.2 Les techniques de levé actuelles

Nous allons présenter les différentes techniques de levé utilisées actuellement. Nous indiquerons également les avantages et inconvénients de chacune d'elle.

2.2.1 La lasergrammétrie : le matériel

Dans le but de réaliser les acquisitions nous avons à notre disposition deux scanners laser : le Leica C10 (illustration 2.3) et le HDS 7000 (illustration 2.4). Les caractéristiques des deux scanners lasers sont différentes ; le HDS 7000 mesure les distances par décalage de phase et le Leica C10 par temps de vol. Ces deux techniques ont pourtant la même procédure d'acquisition qui consiste en un balayage laser d'un objet permettant d'obtenir un nuage de points de coordonnées tridimensionnelles.

Les scanners à temps de vol utilisent un faisceau laser pulsé ; la distance est calculée par la mesure du temps que met le train d'impulsion à faire l'aller-retour (cf. [Landes, Grussenmeyer, 2011]). Voici la formule permettant de déterminer la distance :

$$D = \frac{c_0}{2n} \times \Delta_t$$

avec c_0 : la célérité
 n : l'indice du milieu ($n_{\text{air}} \approx 1,0003$)
 Δ_t : le temps de parcours
 D : distance



Illustration 2.3 - Laser scanner C10 -
Source : @Leica Geosystem

Les scanners à différence de phase émettent un faisceau laser continu modulé en amplitude ; la distance est déterminée par la différence de phase entre les modules de lumière reçus et envoyés (cf. [Landes, Grussenmeyer, 2011]). Voici le procédé de calcul :

$$2D = v \times t = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \times \frac{v}{f} + N \times \frac{v}{f} = N\lambda + \Delta\lambda$$

avec N : nombre d'entier de longueurs d'onde entre le signal reçu et le signal émis
 D : distance mesurée
 f : fréquence de l'onde modulée
 λ : longueur d'onde du faisceau



Illustration 2.4 - Laser scanner HDS 7000 - Source : @Leica Geosystem

Le tableau 2.1 présente les caractéristiques techniques propres à chacun des scanners lasers d'après leurs fiches techniques ([@Leica Geosystem notice HDS 7000, vu juillet 2013] et [@Leica Geosystem notice C10, vu juillet 2013]).

	Leica C10	HDS 7000
Champs visuel	360° horizontale 270° verticale	360° horizontale 320° verticale
Longueur d'onde	532 nm (visible)	1,5 μm (invisible)
Portée minimale/maximale	0,1 m / 300 m	0,3 m / 187 m
Précision mesure d'angle	60 μrad	125 μrad
Précision mesure de distance	4 mm à 50 m	2,7 mm à 50 m (cible noire)
Précision sur la position du point	6 mm à 50 m	/
Diamètre du laser	4,5 mm à 50 m	1,5 mm à 1,5 m
Nombre de points à la seconde (maximum)	50 000 points/s	≈ 1 000 000 points/s
Caméra intégrée	Oui dimension : 1920 x 1920 (4 mégapixels)	Non

Tableau 2.1 - Comparaison des caractéristiques techniques des lasers scanners - Source : @Leica Geosystem

Comme le montre le tableau 2.1, les scanners lasers sont différents en tous points. Nous constatons que le HDS 7000 est plus précis sur la mesure de distance et plus rapide. Ce scanner laser est néanmoins plus adapté à la réalisation de mesure en intérieur.

2.2.2 Photogrammétrie terrestre

2.2.2.1 Définition

Photogrammétrie analogique (1900 à environ 1970): repositionnement physique de deux clichés tels qu'ils étaient lors de la prise de vue grâce à un appareil spécifique : problème de mécanique, de précision et d'optique [Cours Photogrammétrie L. Chandelier ES1, 2008a].

La photogrammétrie numérique a vu le jour dans les années 1990. Elle a amené deux grandes innovations : la *formule d'image* (liant les coordonnées terrains et clichés) et l'*aérotriangulation* (mise en place d'un ensemble d'images simultanément).

La formule image relie les coordonnées image et terrain, elle est aussi appelée *équation de colinéarité* (ci-dessous sa forme matricielle et l'illustration 2.5, [Cours Photogrammétrie E. Simonetto

ES2, 2011-2012]). La relation pour un couple stéréoscopique est donnée par la formule et l'illustration 2.6 (cf. [Cours Photogrammétrie L. Chandelier ES1, 2008b]).

$$m_c = F - \frac{k^T FR(M-S)}{k^T R(M-S)}$$

m_c : coordonnées de M dans le repère image
 F : $[x_c, y_c, p]$ coordonnées du centre du cliché dans le repère image, p la focale
 o, c : le point principal d'autocollimation
 c'est également la projection de F sur P

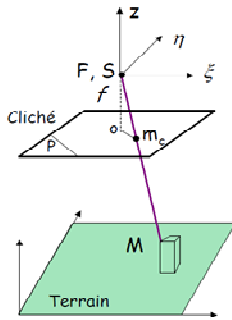


Illustration 2.5 - Représentation de la formule image - Source : E. SIMONETTO

$$\det(\overrightarrow{S_1 S_2}, \overrightarrow{S_1 m_{c1}}, \overrightarrow{S_2 m_{c2}}) = 0$$

S : coordonnées de F dans le repère terrain
 R : matrice de rotation du repère terrain (X, Y, Z) au repère image (x, y, z)
 B : distance $S_1 S_2$, base

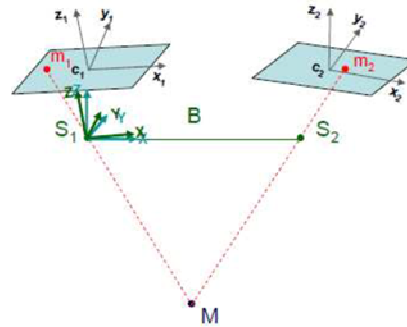


Illustration 2.6 - Couple stéréoscopique - Source : L. CHANDELIER

Ces formules ne sont rigoureusement exactes que si les optiques employées sont corrigées des distorsions. Elles permettent de calculer les coordonnées terrain à l'aide de coordonnées images en utilisant des points d'appuis qui ont été au préalable déterminés.

2.2.2.2 Matériel photographique

Nous disposons pour cette étude de deux appareils photos de marque CANON : un EOS 7D et un EOS 5D Mark III (voir illustration 2.7).



Illustration 2.7 - De gauche à droite : CANON EOS 7D (Source : @Clubic.com) et CANON EOS 5D (Source : @01.net)

Ces deux appareils ont des caractéristiques techniques différentes qui sont présentées dans le tableau 2.2 [@CANON, vu juillet 2013]:

	EOS 7D	EOS 5D Mark III
Capteur d'image	CMOS 22,3 mm x 14,9 mm	CMOS 24 mm x 36 mm Full Frame
Nombre de pixels effectifs	18 millions de pixels	22,3 millions de pixels
Temporisation minimum/maximum	1/8000 s à 30 s	1/8000 s à 30 s
Agrandissement avec objectif 50 mm	Environ 1	Environ 0,71
Processeur d'image	Double DIGIC 4	DIGIC 5+
Distance focale	Équivalente à 1,7 x celle de l'objectif	Équivalente à celle de l'objectif

Tableau 2.2 - Caractéristiques techniques des appareils photos reflex - Source : @CANON

Nous constatons plusieurs améliorations dans la gamme du 5D, au niveau du capteur d'image notamment, qui est un « Full Frame » (plein format). C'est un capteur haut de gamme qui fait référence à la taille d'un film argentique 35mm. D'après le site [[@tom'sGUIDE](#), vu juillet 2013] *la taille accrue du capteur procure plusieurs avantages en terme de qualité d'image dans des conditions de basse luminosité. Plus la surface du photosite est étendue, moins la qualité de l'image est dégradée par le grain (bruit) lorsque la luminosité est faible.* Le champ de vision de ce capteur est plus large comme le montre l'illustration 2.8. Le cadre rouge correspond à un capteur CMOS 22,3 mm x 14,9 mm, comme c'est le cas pour le 7D.



Illustration 2.8 - Photo Full Frame avec superposition d'un cadre CMOS 22,3 x 14,9 mm - Source : @tom'GUIDE

Le nombre de pixels est plus important sur le 5D. Couplé avec le capteur Full Frame, la qualité de la photo en est meilleure. De plus, le processeur d'image n'est pas le même : le DIGIC 5+ est 6 fois plus rapide que le DIGIC 4 et produit 75 % moins de bruit (cf. [[@Wikipedia](#), vu juillet 2013]).

D'après ces caractéristiques nous pouvons dire que le Canon EOS 5D Mark III propose une meilleure qualité d'image que l'EOS 7D. Cette différence peut induire une qualité de nuage de points 3D créée différente.

2.3 La nouvelle perspective du drone

2.3.1 Historique

L'aéromodélisme est une forme de modélisme qui s'est développée en concordance avec l'aviation pour représenter cette dernière à des échelles différentes. Dans ce domaine, le poids et la taille ne sont pas des critères contraignants ; le seul élément qui diffère d'un avion taille réelle est l'absence d'un pilote à bord de l'aéronef. Les différents matériaux utilisés pour leur construction peuvent aller du carton au carbone. Il est néanmoins important de noter que l'aéromodélisme n'implique pas forcément que l'aéronef soit téléguidé, il peut être aussi une maquette destinée à la démonstration.

2.3.2 Les innovations

D'année en année, des perfectionnements permettant d'améliorer la stabilité de l'aéronef, son autonomie, sa maniabilité et sa résistance aux éléments (vent, pluie) sont apparus.

Les recherches sur les capacités du drone sont toujours en cours et en perpétuelle amélioration. Des écoles d'ingénieurs étudient les drones Quadrirotor en leur insufflant une intelligence via une programmation avancée. Nous pouvons par exemple citer les drones capables de construire un mur en totale autonomie ou encore capables de faire tenir en équilibre une bille à l'extrémité d'une tige malgré les interactions qui pourraient subvenir sur celle-ci [[@RTS.ch](#), vu mars 2013].

L'armée est un des piliers de ces avancées technologiques. Les militaires sont généralement les premiers à inventer de nouvelles technologies à des fins de défense qui sont accessibles au grand public plusieurs années après. Ils ont par exemple inventé un drone pigeon (cf. article de presse [[@Lematin.ch](#), 2013]) qui peut recharger ses batteries en se posant sur des fils électriques ; cette invention est très intéressante en milieu ferroviaire car nous pouvons imaginer que le drone puisse se charger à partir des fils caténaies.

Par ailleurs, au delà des développements impactant le vecteur drone, des améliorations sur les différents types de capteurs embarqués sont en cours. La miniaturisation des capteurs Lidar pourra, par exemple, permettre la vulgarisation de ce type d'acquisition. Ainsi, le drone trouverait sa pertinence dans des activités autres que la « simple » prise de vue aérienne, ce qui le rendrait polyvalent.

2.3.3 Champs d'application

Les champs d'application d'un drone sont très vastes, pouvant aller de l'agriculture à des domaines de défense.

En France l'utilisation des drones est variée. Par exemple, les pompiers ont mis en place un système de détection de départ de feu et de front de feu pour intervenir au plus vite.

Dans le domaine de la topographie cette technologie est nouvelle mais présente un potentiel pour lever les zones à risques, inaccessibles et les zones de grande étendue. En utilisant les photos, ces drones permettent d'obtenir en quelques heures des données qui représentent plusieurs jours de travail par méthode classique. Les drones peuvent par exemple être employés pour l'acquisition d'informations dans les zones suivantes :

- Les carrières
- Le réseau ferroviaire
- Le réseau routier
- Les zones de montagne, etc.

Dans le domaine militaire, les drones sont principalement destinés à la surveillance des zones à risque ou encore à la topographie des cartes de guerre. Ils appuient également les soldats au sol.

2.3.4 Les différents modèles de drones

Plusieurs catégories de drones coexistent :

- Drone à voilure fixe
- Drone à voilure tournante
- Ballons

2.3.4.1 Voilure fixe

Les drones à voilure fixe sont de type avion ou planeur et sont principalement utilisés pour des observations linéaires telles que les réseaux routiers ou encore ferroviaires. Les avantages et inconvénients de ce type de drone dépendent de leurs caractéristiques respectives (taille, poids, résistance...). Les caractéristiques techniques de certains drones sont fournies dans le tableau 2.3 d'après [[@Direct INDUSTRY](#), vu mars 2013a] et les sites internet des différents constructeurs.

Constructeur	Modèle	Poids décollage / Taille	Autonomie vol	Charge utile
<i>Bormatec (allemand)</i>	MAJA / Q / Explorer / VAMP	300 g à 2,5 kg / 85 cm à 220 cm	30 min à 1h	1,5 kg (MAJA) 1 kg (VAMP) 2,5 kg (EXPLORER)
<i>Delair-Tech (français)</i>	DT-18 / DERIC / DT-16	2 à 6 kg	4h	250g (DT-18) 300 g (DT-16)
<i>Survey Copter (français)</i>	DVF2000 / DRAC	8,2 kg à 9,5 kg / 3 m à 3,30 m	2h	1,1 kg (DVF2000) 1 kg (DRAC)
<i>Fly-n-Sense (Suisse)</i>	SEEKER 1300	2,4 kg / 1,66 m		500 g
<i>INSITU</i>	ScanEagle / Integrato	20 kg à 61 kg / 3,11 m à 4,8 m	24h (ScanEagle)	17 kg (Integrator)
<i>Mavinci</i>	SIRIUS	2,7 kg / 1,63 m	55 min	
<i>Aerovision</i>	Fulmae	19 kg / 3,1 m	8h (800 km)	
<i>Zala Aero</i>	421-16 / 421-08 / 421-20 / 421-21-Demo / 421-09 / 421-04M	1,2 kg à 200 kg / 80 cm à 6 m	40min à 8h	250 g à 50 kg
<i>CyberFlight</i>	CyberEye I / CyberEye II / E-Swift Eye / Maveric	1,2 kg à 60 kg / 75 cm à 9,4 m	45min à 10h	200 g à 20 kg

Tableau 2.3 - Liste (non exhaustive) des modèles à voilures fixes par

2.3.4.2 Voilure tournante

Les drones à voilure tournante sont de type hélicoptère et permettent de faire du vol stationnaire. Leur domaine d'utilisation est principalement l'observation de zones inaccessibles (paroi rocheuse, surveillance de zones sensibles etc.). Il est important de noter qu'il existe différentes sous-catégories de drones à voilures tournantes :

➤ Hélicoptère classique

Ce modèle à échelle réduite est en tout point similaire à un hélicoptère. Les 2 rotors permettent une stabilisation de l'appareil pendant le vol en faisant varier le pas des pales. Le rotor principal a pour effet d'assurer la fonction de sustentation et le rotor de queue annule le couple (force de rotation qui fait tourner un objet autour d'un axe). L'inconvénient de ce système réside dans sa forte consommation d'énergie, sa fragilité mais également dans son "bruit" de fonctionnement.

➤ Double rotor contrarotatif (illustration 2.9)

L'appareil est équipé de 2 rotors coaxiaux tournant en sens opposés. Ce dispositif a pour effet d'annuler l'effet de couple et permet d'augmenter la **charge utile**. Très stable il permet de faire du vol stationnaire mais uniquement dans des bonnes conditions météorologiques (vent très faible).



Illustration 2.9 - Hélicoptère à double rotor contrarotatif - Source : @Big Squid RC

➤ Rotor à pas fixe caréné et volets

L'appareil possède un rotor principal à pas fixe qui permet d'assurer la sustentation. Les volets sont situés sur les pales du rotor et permettent de contrôler le roulis, le lacet et le tangage.

➤ Quadrirotor

Il est composé de 4 rotors positionnés en croix comme le montre l'illustration 2.10. Les rotors avant et arrière tournent dans le sens contraire des rotors latéraux. Le pilotage du tangage, roulis et lacet se fait par variation de la vitesse de rotation des rotors.



Illustration 2.10 - Quadrirotor -
Source : @Wikipedia

➤ Convertibles

Ces drones cumulent les avantages de l'avion et de l'hélicoptère (voir l'illustration 2.11). Le passage entre les deux se fait par un système de rotation des pales de leur position horizontale à verticale. Ce système est très complexe à réaliser donc onéreux et rare.



Illustration 2.11 - Convertible -
Source : @Omnilogie

Le tableau 2.4 énumère une liste non exhaustive des constructeurs proposant ces modèles ([@Direct INDUSTRY, vu mars 2013b] et les sites internet des différents constructeurs).

Constructeur	Modèle	Poids décollage / Taille	Autonomie vol	Charge utile
<i>Infotron</i>	<i>IT180-5 TH / IT180-5 EL</i>	14 kg / 1,8 m	30 min à 90 min	3 kg à 5 kg
<i>Vision du Ciel</i>	<i>ExaPix</i>	1,3 kg à 2,5 kg / 70 cm	15 min à 18 min	500 g à 1,5 kg
<i>Zala Aero</i>	<i>421-02 / 421-06 / 421-02X / 421-21 / 421-15 / 421-23</i>	1,5 kg à 95 kg / 0,6 m à 3,65 m	20 min à 6h	300 g à 40 kg
<i>Schielbel</i>	<i>CAMPCOPTER S-200</i>	200 kg / 3,1 m	6h à 10h	50 kg
<i>CyberFlight</i>	<i>Cyberquad / Dominator / DM-65</i>	1 kg à 2 kg / 53 cm à 65 cm	20 min à 40 min	aucune
<i>Helipse</i>	<i>HE 190 / HE 190 VE / HE 300 /</i>	7 kg à 25 kg / 2,25 m à 3,05 m	1h (HE 190)	7 kg à 20 kg

Tableau 2.4 - Liste des modèles à voilure tournante par constructeur

2.3.4.3 Ballons

Ces drones sont de type dirigeable, ballon et montgolfière. Leurs dimensions et poids sont réalisés sur mesure en fonction du type de mission et de la charge utile embarquée. Les dirigeables ont une autonomie de plusieurs heures ce qui est un avantage très important par rapport à certains drones à voilure fixe ou mobile qui ont une autonomie d'une heure en moyenne.

Ils sont dirigés soit par pilotage automatique soit en mode manuel (téléguidage) avec une « station sol ». Durant tout le vol, le dirigeable transfère en temps réel les données qu'il acquiert.

Leurs domaines de prédilection sont principalement la surveillance et la prise de mesures atmosphériques (exemple des ballons sondes).

- **Montgolfière** : [*@Wikipédia*, vu mars 2013a]
Elle a été inventée par les frères Montgolfier en 1782. C'est un aérostat dont la sustentation est assurée par de l'air chaud contenu dans le ballon. Son décollage est possible grâce à la poussée d'Archimède qui est due à la différence de température, donc de densité, de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du ballon. Ce type d'aérostat ne peut être dirigé que verticalement, sa destination étant déterminée grâce aux vents et courants chauds.
- **Dirigeable** : [*@Wikipédia*, vu mars 2013b]
C'est le même principe que la montgolfière ; la seule différence réside dans la présence d'un système de propulsion qui lui procure une maniabilité plus importante.
- **Ballon à gaz** : [*@Wikipédia*, vu mars 2013c]
Il existe des ballons à gaz et des ballons à air chaud. Ceux à gaz contiennent un gaz moins dense que l'air pour la même température ; ces gaz sont généralement du dihydrogène, du gaz d'éclairage ou de l'hélium. Il peut être dirigé verticalement uniquement, les mouvements horizontaux étant obtenus à l'aide des courants aériens.
Ceux à air chaud fonctionnent quant à eux comme les montgolfières.

Le tableau 2.5 établit une liste non exhaustive des constructeurs proposant ces modèles ([*@Direct INDUSTRY*, vu mars 2013c] et les sites internet des différents constructeurs).

Constructeur	Modèle	Poids décollage / Taille	Autonomie vol
<i>Fosung</i>	Aerostat	300 kg	10 jours
<i>Survey Copter(français)</i>	Ballon BLIMP 2C / Ballon BLIMP 37M	900 g à 10 kg / 3 m à 9 m	1h

Tableau 2.5 - Liste des modèles de type ballon

2.3.5 Les limites physiques et applicatives de ce matériel

Chaque matériel a ses avantages et inconvénients qu'ils soient techniques ou environnementaux. L'énumération de ces limites est faite dans le tableau 2.6.

	Voilure fixe	Voilure tournante	Ballon
Type de vol	Linéaire	Stationnaire et linéaire	Linéaire
Conditions de vol	Résistant aux vents faibles et pluies faibles	Sensible aux conditions météorologiques	Dirigeable : maniable
Nuisance sonore	Silencieux	Bruyant	Silencieux
Type de levé	Levés linéaires, zones dégagées	Zones inaccessibles, levés linéaires	Levés linéaires

Tableau 2.6 - Comparaison des modèles

Nous constatons que les drones à voilures tournantes sont beaucoup plus maniables ; ils peuvent effectuer des vols stationnaires et linéaires. Cette faculté représente un atout majeur pour de nombreux chantiers.

2.3.6 Description du drone de la SNCF

La SNCF a acquis un drone à voilure tournante pour les inspections des voies et pour l'acquisition de données photogrammétriques sur les parois rocheuses présentes aux abords des infrastructures ferroviaires. Il a été acheté à l'entreprise Helipse. Ce drone, de type hélicoptère, est doté de plusieurs capteurs et technologies qui sont nécessaires et/ou obligatoires pour l'obtention des autorisations de vol auprès de la **DGAC** (Direction Générale de l'Aviation Civile).

2.3.6.1 La structure

Ce drone (voir illustration 2.12, [*@Helipse*, vu février 2013]) peut atteindre un poids de 24 kg avec le maximum de charge utile. Il est composé d'une carène principale et d'une nacelle. L'aéronef peut être piloté à distance via une « station sol », qui dispose de plusieurs matériels qui servent de relais avec le drone.



Illustration 2.12 - Drone HE 190

Carène principale :

Elle contient les différents capteurs et composants nécessaires au vol ainsi que les dispositifs de sécurité exigés par la DGAC. Nous pouvons visualiser ces différents systèmes sur les illustrations 2.13.

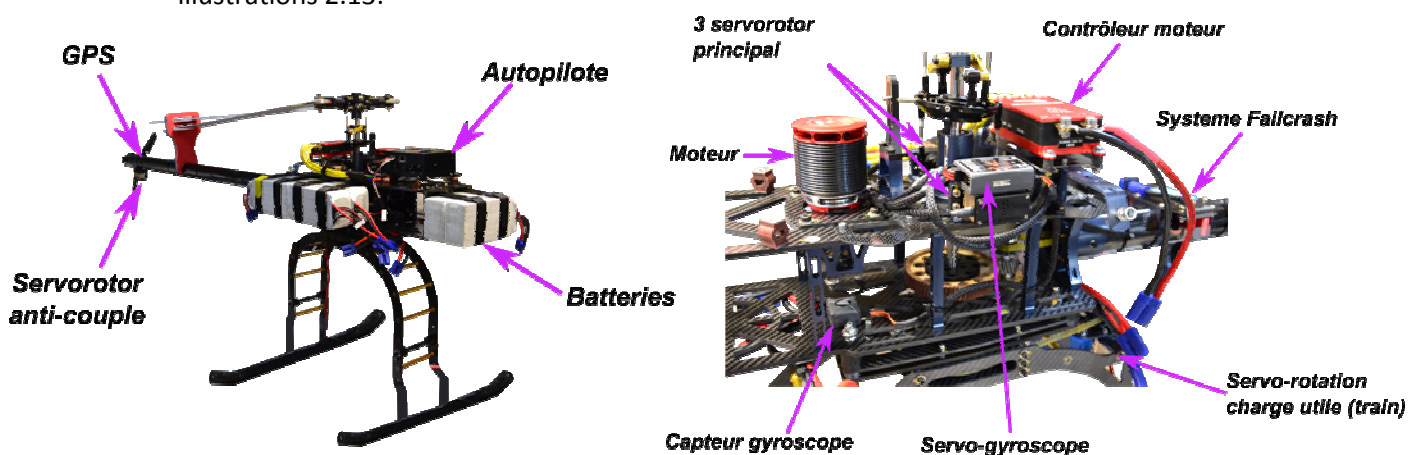


Illustration 2.13 - Drone HE 190 - Gauche : l'ensemble du drone sans la carène ; Droite : les composants électroniques

- **L'autopilote** sert à corriger la position du drone par rapport aux éléments naturels qui pourraient perturber son vol comme, par exemple, le vent léger. Afin de compenser sa position, l'autopilote joue sur les gains des rotors ce qui permet de contrôler le pas des pales.
- **Les batteries** sont au nombre de 10 pour une autonomie de vol d'environ 40 minutes.

- **Le moteur et le contrôleur moteur :**
Le contrôleur moteur sert à alimenter successivement les trois phases du moteur.
Le moteur sert à actionner les rotors qui permettent de voler.
- **Le servomotor anti-couple** ajuste le gain du rotor pour affiner les déplacements en fonction de la pression exercée sur les manettes de gaz.
- **Les servomotors principaux** contrôlent le pas des pales pour ajuster la position du drone.
- **Le servo-gyroscope et son capteur** permettent d'adapter la position du drone afin qu'il soit toujours à l'horizontale.
- **Le servo-rotation** permet la rotation de la nacelle.
- **Le système Failcrash** est un dispositif de sécurité indépendant en batterie et logistique qui permet de faire s'écraser le drone s'il ne respecte pas les paramètres qui pourraient mettre en péril la sécurité des tiers (absence de retour radio de la station sol, ...).

Nacelle :

C'est une boule gyrostabilisée contenant l'appareil photo et une caméra visant le sol. Le dispositif électronique de la nacelle permet de réaliser le déclenchement des clichés à distance et, d'observer la photo réalisée à l'aide d'une caméra positionnée sur le viseur.

Les photos ne sont pas géoréférencées car Le GPS embarqué n'est pas en liaison avec l'appareil photographique.

La station sol :

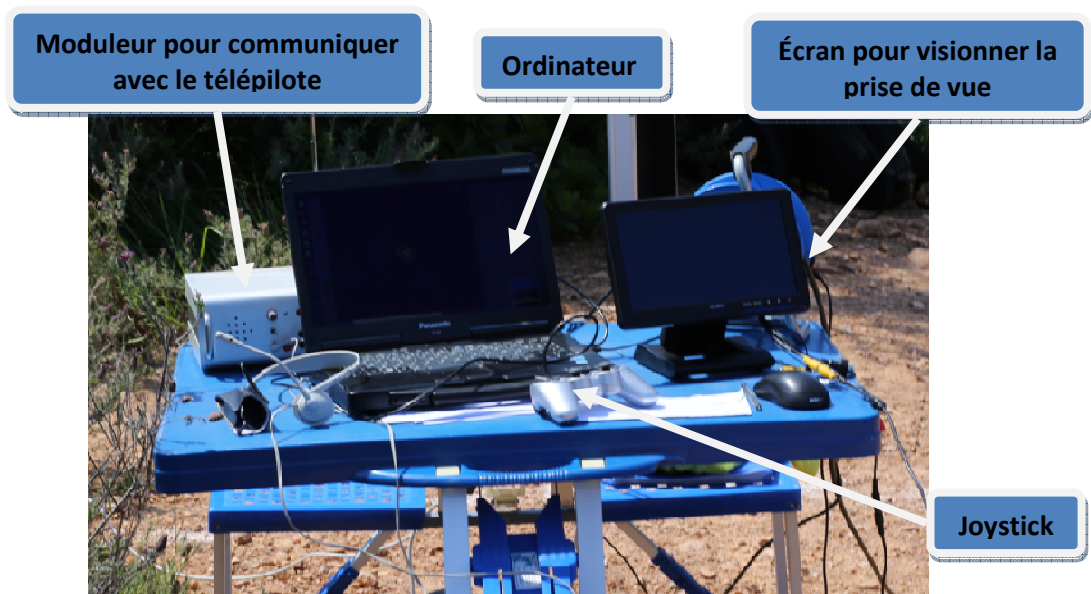


Illustration 2.14 - Éléments de la « station sol »

L'illustration 2.14 montre les différents éléments de la « station sol » il faut ajouter à cela un émetteur/récepteur wifi pour connecter la station sol au drone et une antenne reliant l'écran de prise de vue à la caméra se situant sur le viseur de l'appareil photo.

2.3.6.2 Le logiciel

Le logiciel a été développé par un partenaire américain d'Helipse sous Ubuntu. Il permet de diriger le drone à distance grâce au pilote automatique. L'illustration 2.15 donne un aperçu de l'interface du logiciel.

N.B : le logiciel n'étant pas conçu par des géomètres certaines fonctions ou capacité sont encore à développer (ex : insertion d'orthophotos).

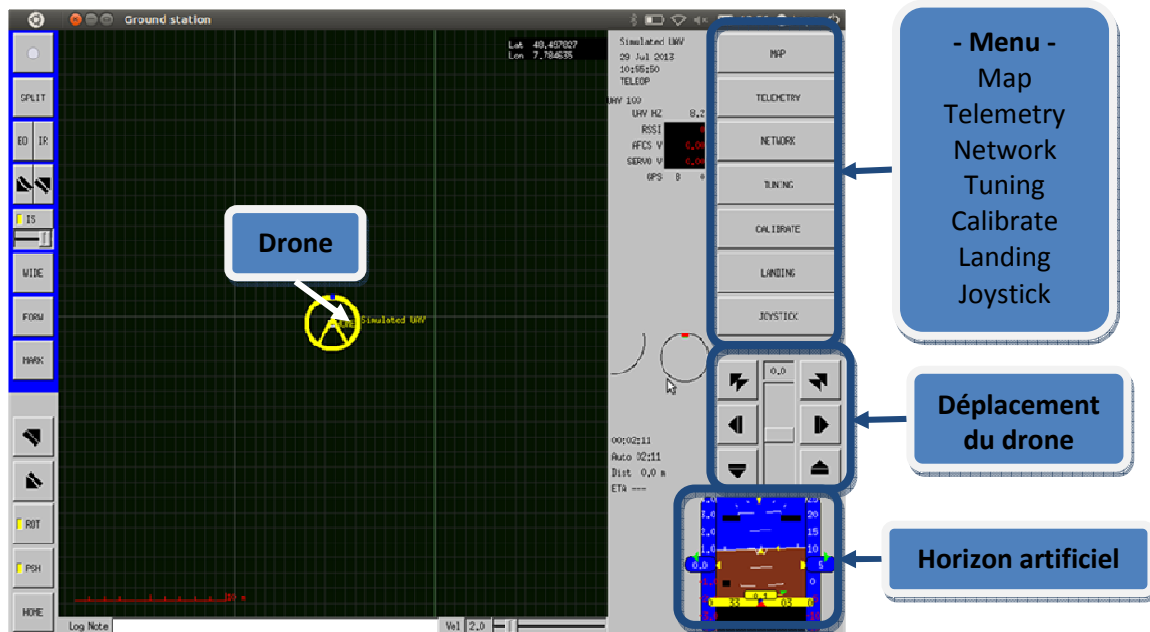


Illustration 2.15 - Logiciel Drone HE 190

Le logiciel propose différents menus principaux :

- **Map** : cette fonction permet d'insérer une carte en fond d'écran. Elle ne prend pas en compte les données telles que les coordonnées. En effet le calage du fond de carte se fait en cliquant la position approximative du drone sur le plan.
- **Telemetry** : permet de connaître la position du drone par rapport à sa position initiale « HOME ». Une fonction « Reset Tangent » permet de modifier les coordonnées du « HOME » initial et de les remplacer par la position actuelle du drone.
- **Network** : renseigne le nom et les coordonnées du drone. Une fonction « Flyto » dirige le drone vers des coordonnées indiquées.
- **Tuning** : ce sont les paramètres de l'autopilote (le pas des rotors, etc.).
- **Calibrate** : calibre la boussole interne du drone. Cette fonction doit être répétée lors d'un changement de zone de vol.
- **Landing** : atterrissage automatique.
- **Joystick** : paramétrage des boutons de la manette PlayStation permettant de piloter le drone.

Dans le logiciel, le drone peut être déplacé avec la souris en cliquant sur le lieu de destination (voir illustration 2.16).

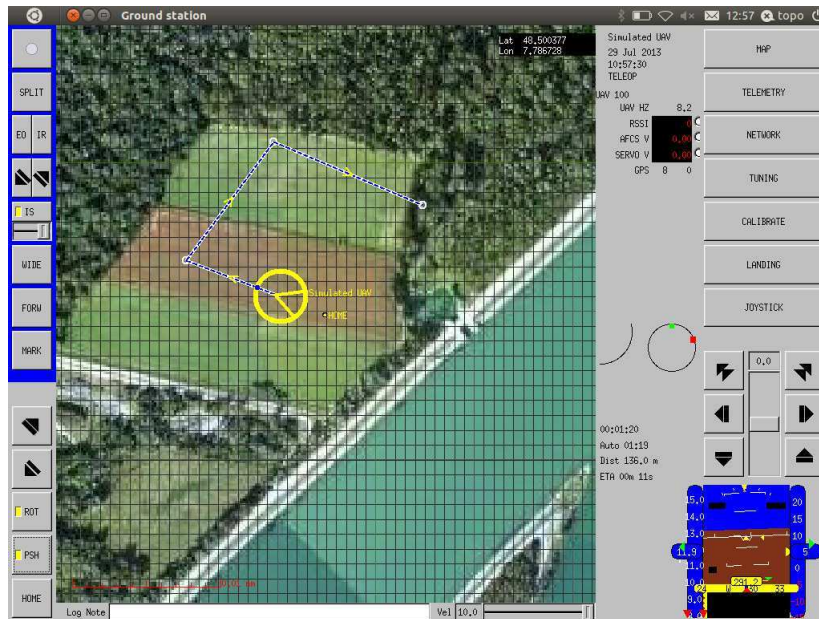
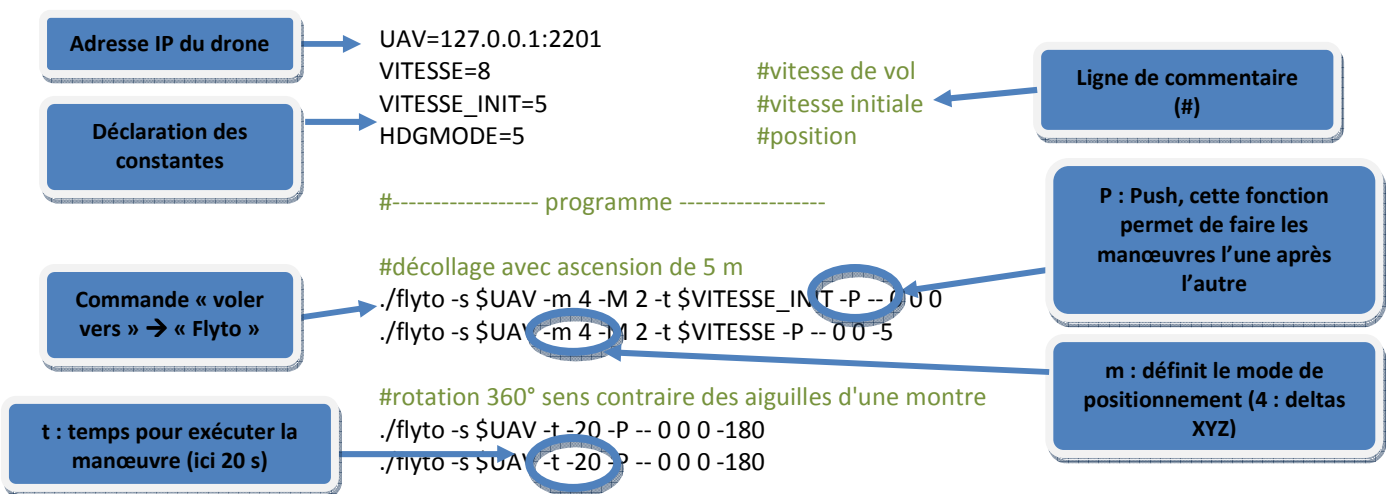


Illustration 2.16 - Exemple de déplacement de drone avec une carte

Il est possible de créer des programmes de pilotage. Ceux-ci permettent d'améliorer la gestion du temps sur le terrain en facilitant les manœuvres du drone. Voici un exemple de programme :



Le logiciel est un outil de contrôle pour la DGAC. Une trace des déplacements du drone doit être conservée dans le cas d'un incident ; cette trace est généralement un fichier informatique. Il faut pouvoir prouver que les manœuvres du drone ne sont pas responsables de l'incident. Le drone pouvant être utilisé à des fins d'espionnage ou de surveillance mettant la sécurité des tiers en jeu, une législation stricte a été mise en place.

2.3.7 La législation pour les aéronefs légers

2.3.7.1 Objectifs de la loi

Malgré l'absence de pilote à bord, le drone est soumis à une réglementation spécifique. La France est le premier pays au monde à avoir écrit une réglementation pour l'insertion de drones dans l'espace aérien.

Toute construction pénétrant dans l'espace aérien est soumise aux règles de l'air en complément d'une réglementation particulière qui pourrait s'appliquer. Dans notre cas, les drones sont régis par deux arrêtés :

- *Arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent [@Legifrance, 2012a]*
- *Arrêté du 11 avril 2012 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord [@Legifrance, 2012b]*

Le premier relate les différentes catégories d'aéronefs ainsi que les *scénarii* dans lesquels ces aéronefs peuvent voler et sous quelles conditions. Il mentionne également les différents documents que le télépilote doit posséder pour faire voler le drone dans les différents *scénarii* et/ou modèles. Le deuxième mentionne quant à lui la réglementation sur les hauteurs de vol applicables en fonction des infrastructures d'aviation existantes dans la zone de vol.

2.3.7.2 Synthèse

Dans cette partie nous nous focaliserons sur la catégorie du drone acquis par la SNCF qui est de catégorie E. Le résumé complet de l'article de loi [@Légifrance, 2012a] figure en **Annexe 1 : Résumé article du 11 avril 2012 - relatif à la conception des aéronefs civils.**

La catégorie E concerne les aéronefs télépilotés qui ne sont pas des aéromodèles et ne sont pas de catégorie C ou D, motorisés ou non, de masse maximale au décollage inférieure à 25 kg ou pour les aéronefs télépilotés à gaz inerte de masse totale inférieure à 25 kg.

Le drone SNCF permet de voler dans les *scénarii* S-1 et S-2 qui sont complètement différents. Dans le scénario S-1 le télépilote doit avoir une vue directe avec l'aéronef et ne pas être à plus de 100 m de celui-ci. Durant son vol, le drone ne peut voler au dessus de zones peuplées pour des raisons de sécurité vis-à-vis des tiers. Le télépilote doit pour cela gérer parfaitement sa zone d'étude dans le but d'éviter qu'un tiers ne pénètre dans ce périmètre.

Le scénario S-2 permet au télépilote de ne pas avoir une vue directe avec l'aéronef et d'être à moins de 1 000 m de l'aéronef. Ce vol est autorisé si l'aéronef dispose d'une caméra embarquée, reliée à la « station sol », dirigée vers le sol et d'une seconde caméra dirigée vers l'avant pour permettre au télépilote de manœuvrer l'engin. Ce scénario ne permet toujours pas de voler au dessus d'une zone peuplée.

D'après [@Legifrance, 2012b] : pour un drone de catégorie E, l'altitude de vol est définie selon deux critères :

- Le type de scénario.
- La distance séparant la zone d'étude et une infrastructure destinée à l'atterrissage ou au décollage.

En scénario S-1 il doit voler à une hauteur inférieure à 150 m par rapport au sol et à 50 m au dessus d'un obstacle artificiel de plus de 100 m. Dans le deuxième cas l'illustration 2.7 montre la hauteur en fonction de la distance et du type d'infrastructure :

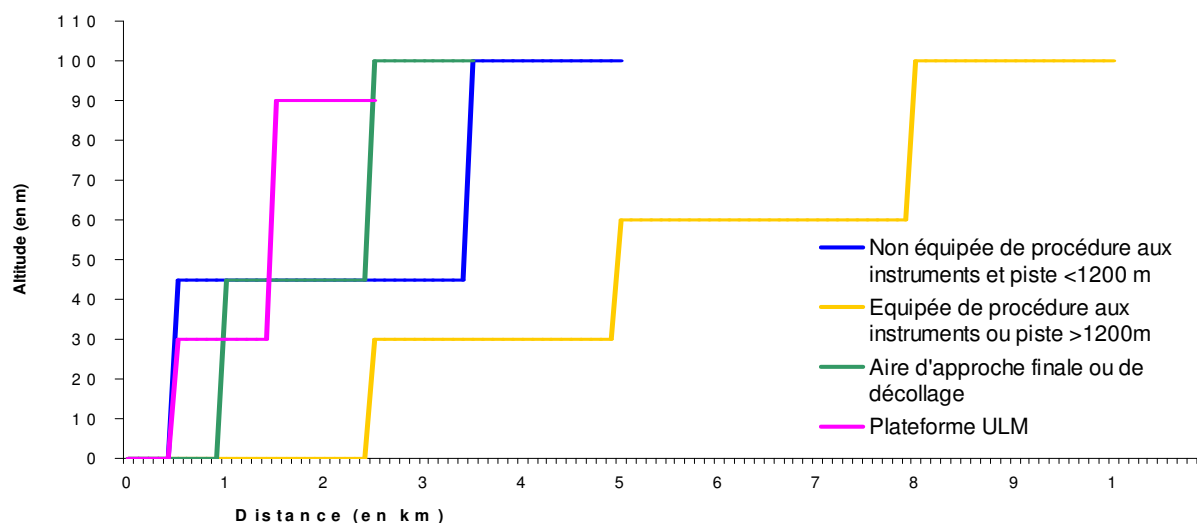


Illustration 2.17 - Hauteur de vol en fonction des distances et du type d'infrastructure - Source : SNCF

Les drones de catégorie E sont dispensés de document de navigabilité (ce dernier donne l'autorisation à l'aéronef de voler). Malgré cette dispense, le drone ne peut pas voler comme bon lui semble car toute opération doit être accompagnée de différents documents administratifs.

2.3.8 Préparation des chantiers : Documents administratifs

2.3.8.1 MAP (Manuel d'Activités Particulières) et autorisations spéciales

Ce manuel contient toutes les activités que le drone exécutera. Il permet à l'aéronef de voler dans les scénarii mentionnés sans une demande d'autorisation à la DGAC. Il regroupe :

- Les conditions de sécurité,
- La procédure d'exécution des activités particulières pour chaque type d'aéronef,
- Le rappel des règles de l'air,
- La responsabilité des télépilotes et leur niveau de formation,
- Les conditions pour un vol de nuit.

Il est soumis à validation du ministère de l'aviation civile pour obtenir la déclaration de conformité. Après acceptation du document, le MAP et la déclaration de conformité sont déposés au ministère pour obtenir l'attestation de dépôt qui permet à l'aéronef de voler pour les activités mentionnées dans le MAP.

Le MAP n'est pas le seul document permettant d'obtenir une autorisation de vol. Certaines peuvent être demandées dans le cadre de vols expérimentaux. Les demandes sont soumises à la DGAC à l'aide d'un dossier regroupant les caractéristiques de la zone. Étant en phase de test pour l'acquisition de photos aériennes par drone nous avons obtenu des autorisations spéciales. Ces autorisations sont regroupées dans l'**Annexe 2 : Autorisation particulière de vol du 22 au 25 avril 2013** et l'**Annexe 3 : Autorisation particulière de vol du 28 au 31 mai 2013**.

Le télépilote doit également être en possession de divers documents pour piloter le drone, qui seront énoncés dans le prochain paragraphe.

2.3.8.2 *DNC (Déclaration de Niveau de Compétence)*

Ce document est délivré par l'exploitant suite à une formation pour les activités particulières mentionnées dans le MAP. Sans cette autorisation l'aéronef ne peut pas voler. Réaliser cette formation est indispensable pour, d'une part, connaître l'ensemble des fonctions du drone et, d'autre part, être sensibilisé à la sécurité en vol (pour rappel la sécurité des tiers et des biens peut être mise en jeu en cas de crash du drone). En fonction des *scénarii*, le nombre d'heures de pratique demandé n'est pas le même :

- **S-4** : licence de **pilote d'avion ou d'hélicoptère obligatoire** et justification d'une expérience de **100h de vol** en tant que commandant de bord.
- **S-4** : dans les 6 mois le télépilote doit avoir acquis une expérience de **20h** dans des conditions de vol à vue avec l'aéronef.
- **S-1, S-2 et S-3** : une aptitude théorique (brevet pilote d'avion, d'hélicoptère, de planeur ou d'ULM).

Après obtention du MAP et de la DNC les acquisitions peuvent débuter en ayant une méthodologie de levé.

2.4 Conclusion

Le confortement des parois rocheuses est un facteur important pour la gestion de la sécurité des circulations sur les voies ferrées. Les levés topographiques étant plus précis que celui des géologues le coût des parades sera moins important.

Après l'analyse des réglementations en vigueur, le drone peut, malgré quelques contraintes, survoler les emprises ferroviaires. Des autorisations ont été obtenues pour le chantier que nous allons présenter dans le prochain chapitre.

Les méthodes actuelles pour l'étude de parois rocheuses ont déjà prouvé leur efficacité (cf. [Fievet, 2011] et [Trochon, 2012]). Le drone offre de nouvelles perspectives pour l'auscultation de ces ouvrages. La diversité des modèles de drones permet d'œuvrer sur les chantiers les plus complexes. Dans notre cas l'auscultation de parois rocheuses par voie aérienne est une alternative pouvant augmenter la qualité des données et réduire le coût des parades si la qualité des données est avérée.

3 Levé d'une paroi rocheuse et traitement - application de la méthode drone

3.1 Localisation du chantier

Le chantier qui nous a permis de réaliser l'ensemble des tests se situe sur la ligne 930 000 de Marseille (France) - Vintimille (Italie), sur le tronçon de l'Estérel, à l'entrée de la gare de "Le Trayas" à environ 20 km à l'Est de Saint Raphaël (Département du Var, 83 ; illustration 3-1). Notre zone d'étude se trouve sur la zone 34 du **Pk. 179 + 140** au **Pk. 179 + 365**.



Illustration 3.1 - Localisation du chantier

3.2 Objectif de l'opération

Sur ce chantier, des travaux d'auscultation photogrammétriques et lasergrammétriques ont été entrepris. Ces méthodes, dont la pertinence technico-économique a été démontrée par [Fievet, 2011] et [TROCHON, 2012], nous permettront d'obtenir un modèle 3D précis de la paroi. Ce modèle rendra possible l'évaluation de l'état et de la structure géologique de l'ouvrage. A partir de cela il sera possible d'effectuer le confortement des parois rocheuses de façon à protéger les installations et les circulations ferroviaires contre les chutes de rochers. La précision attendue par les géologues est de l'ordre de 5 cm, c'est la tolérance que nous appliquerons à nos résultats.

3.3 Caractéristiques de la zone 34

3.3.1 Particularités de la voie

La zone 34 est un tronçon d'environ 225 m, à double voies, taillé en tranchée où tous types de trains peuvent circuler (vitesse maximale autorisée 95 km/h). L'alimentation électrique des trains se fait par l'intermédiaire des caténaires, ce qui apporte une contrainte supplémentaire pour l'acquisition des données par méthode aérienne.

En effet, les caténaires constituent des masques pour les levés lasergrammétrique et photogrammétrique (levés réalisés depuis la crête, sensiblement à la hauteur des fils caténaires). Pour le drone, ils rajoutent une contrainte d'altitude de vol minimale (hauteur des caténaires 5 à 6 m) et des masques sur les clichés.

3.3.2 Particularités des parois rocheuses

D'après les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} du **BRGM** (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), les tranchées sont taillées dans un massif volcanique. Le tronçon est en courbe avec un rayon de 476 m et la rampe est négligeable.

Le fait que la zone soit en courbe ne perturbera pas l'acquisition des données lasergrammétrique et photogrammétrique terrestres. Toutefois cela impactera le plan de vol du drone qui devra se déplacer en courbe tout en faisant attention à l'orientation de l'appareil photo pour qu'il soit toujours perpendiculaire à la paroi rocheuse.

3.3.2.1 Côté V1

Les parois sont subverticales allant de 12 m entre le Pk. 179 + 140 et le Pk. 179 + 197, à 21 m entre le Pk. 179 + 197 et le Pk. 179 + 365 (illustration 3-2). Sur le dernier tronçon, on trouve un fossé en crête. La distance de recul (environ 15 à 17 m) et la hauteur des parois vont poser une contrainte. En effet, la hauteur de la paroi peut être en dehors du cadre de la photo. Elle peut néanmoins être contournée en utilisant un objectif de focale 20 mm (avec une focale de 20 mm et une distance de 17 m, l'objet photographié peut avoir une hauteur d'environ 21 m). Ainsi nous pourrons photographier la paroi sur toute sa hauteur (21 m côté V1).

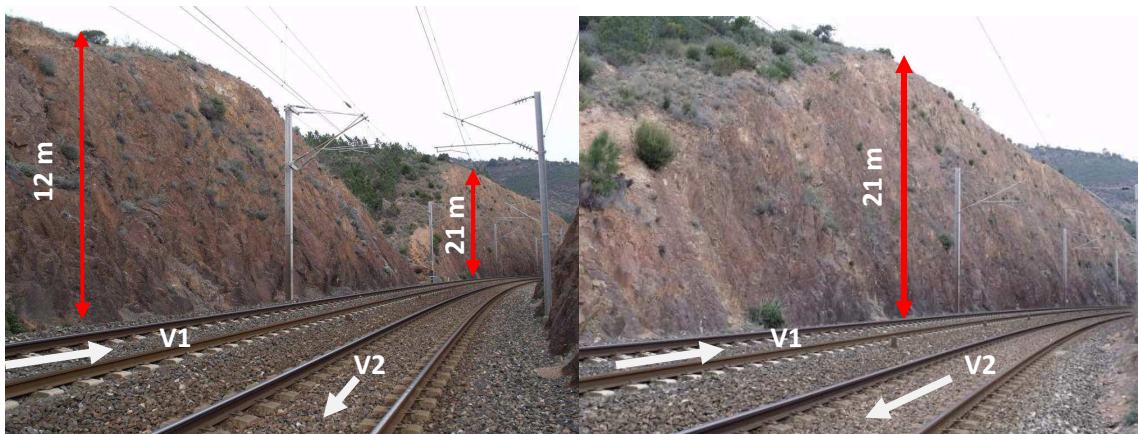


Illustration 3.2 - Paroi de Le Trays V1

3.3.2.2 Côté V2

Les parois sont subverticales d'une hauteur allant de 10 mètres entre le Pk. 179 + 140 et le Pk. 179 + 197, à 12 mètres entre le Pk. 179 + 197 et le Pk. 179 + 360. Sur le dernier tronçon, un revêtement grillagé, plaqué et ancré a déjà été mis en place sur une partie importante de la zone. Pour cette paroi nous rencontrerons les mêmes problèmes de recul que pour le côté V1.

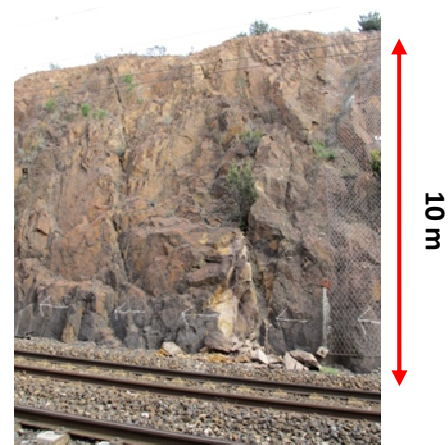


Illustration 3.3 - Paroi côté V2

3.4 Acquisition et traitements par les méthodes actuelles

3.4.1 Levé au scanner laser

3.4.1.1 Le principe de levé

Cet appareil balaie un champ de vision horizontal et vertical (dont les valeurs dépendent de l'appareil) à l'aide d'un faisceau laser. Ce balayage se fait à l'aide d'un axe rotatif qui est un prisme, une lentille ou un miroir oscillant. Il mesure ainsi cinq éléments entre le scanner laser et le point :

- La distance
- L'angle vertical
- Panorama de photos (si caméra interne)
- L'angle horizontal
- L'intensité du signal retour

Ces éléments permettent de créer un nuage de points colorisé, en fonction de l'intensité du signal retour ou du panorama de photos, pour avoir un rendu réel.

Afin d'obtenir un nuage de points complet de la zone mesurée, il est nécessaire de réaliser plusieurs stations de levé. Pour regrouper ces différentes stations, il est judicieux de positionner des cibles réparties sur l'ensemble de la zone de mesure. Ces cibles font office de points connus qui recalent les nuages de points en effectuant trois rotations et trois translations. Aucune mise à l'échelle n'est nécessaire car le scanner lève les points à l'échelle 1/1.

Pour réaliser ces opérations, il faut disposer de **trois cibles communes minimum** entre les différentes stations. L'utilisation d'une **quatrième** pourra servir de point de **contrôle** et ainsi assurer la qualité de l'assemblage multi-stations. Ce contrôle peut permettre d'éviter une erreur qui impacterait le nuage de points unifié et donc la précision de ce dernier.

Pour notre projet nous cherchons à obtenir une incertitude maximale de mesure de 5 cm sur la paroi rocheuse. Toutefois afin de pouvoir comparer les nuages de points obtenus à l'aide des différentes méthodes, nous souhaitons obtenir une meilleure détermination du nuage de points lasergrammétrique. En effet, ce nuage de points sera considéré dans la suite de l'étude comme la valeur la plus probable de l'observation.

Le protocole de levé scanner est détaillé dans l'**Annexe 4 : Protocole levé scanner laser 3D**.

3.4.1.2 Traitement

Pour traiter les différents nuages nous utilisons le logiciel *Cyclone* de *Leica*. En effectuant une consolidation (*Registration*), nous assemblons les nuages en les géoréférençant à partir des différentes cibles déterminées par tachéométrie. Cette étape est extrêmement rapide si les données ne sont pas entachées d'erreurs. Après calcul nous obtenons un résidu maximum de 2,3 cm sur un « Vertex » (comme le montre l'illustration 3.4), ce qui est inférieur à la précision que nous souhaitons obtenir.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector	Group
179291	polygocyc.bt (...)	179332 (Level...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.023 m	(-0.008, -0.017, -0.013) m	Ungrouped
179291	179332 (Level...)	179212 (Level...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.022 m	(0.010, 0.013, 0.015) m	Ungrouped
179311	polygocyc.bt (...)	179282 (Level...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.020 m	(-0.005, -0.017, -0.009) m	Ungrouped
179332	polygocyc.bt (...)	179311 (Level...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.020 m	(-0.007, 0.010, 0.016) m	Ungrouped
179211	polygocyc.bt (...)	179212 (Level...)	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.020 m	(-0.002, 0.019, -0.005) m	Ungrouped

Illustration 3.4 - Erreur de consolidation

Nous obtenons alors le nuage de points de l'ensemble de la zone colorisé à l'aide de l'intensité du signal retour laser (illustration 3.5) :

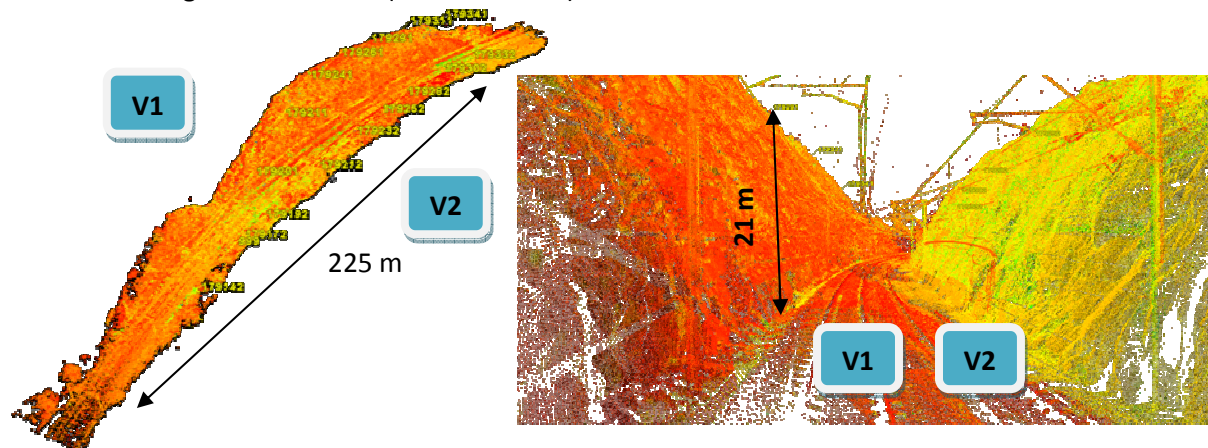


Illustration 3.5 - Assemblage des nuages de points

L'étape suivante est la colorisation du nuage de points à l'aide de clichés photographiques pour obtenir un rendu réel plus pertinent que la colorisation par retour d'intensité du laser.

Comme énoncé dans le tableau 2.1, l'appareil Leica C10 dispose d'un appareil photo numérique intégré ; cependant la qualité de la photo n'est pas optimale pour une colorisation précise. De ce fait, l'utilisation combinée du scanner laser et d'un reflex numérique a été la solution retenue pour obtenir une colorisation de qualité. Les photos sont réalisées à l'aide d'un reflex CANON EOS 5D Mark III (avec un objectif de type Fisheye 8 mm) et d'un bras Nodal Ninja 3 (dispositif Leica permettant de positionner le reflex numérique de manière coaxiale avec la tête de mesure scan, illustration 3.6). L'association des deux composants permet d'effectuer un panorama 360° en horizontal et en vertical. Ce panorama d'une qualité supérieure aux photos du Leica C10 colorisera le nuage pour un rendu plus réaliste. La méthode de colorisation est détaillée dans l'**Annexe 5 : Traitement du nuage scanner**.



Illustration 3.6 - Bras Nodal Ninja 3 -
Source : @Nodal Ninja

Voici le nuage de points assemblé et colorisé (illustration 3.7) :

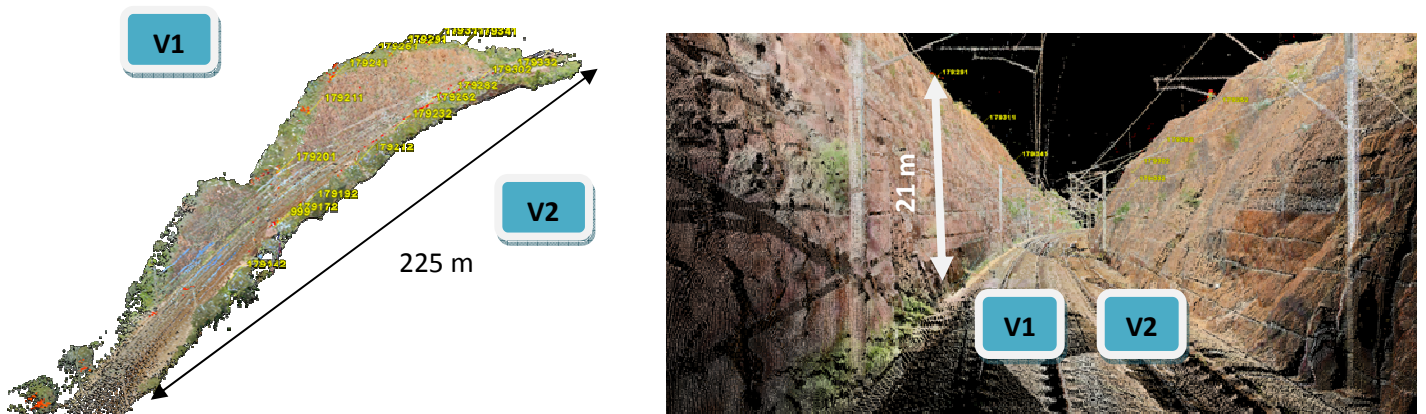


Illustration 3.7 - Assemblage colorisé

3.4.1.3 Création d'un Truview

Une des principales difficultés de l'exploitation des données 3D réside dans leur transmission et leur diffusion. Il est alors intéressant de créer un fichier de type Truview (export qui permet de transformer le nuage de points 3D en images panoramiques 360°). Cela permet de visualiser, par l'intermédiaire d'un plug-in sous Internet Explorer, les données acquises. L'utilisation de ce type de fichier rend donc accessible au plus grand nombre la donnée et la rend visible sans formation topographique particulière.

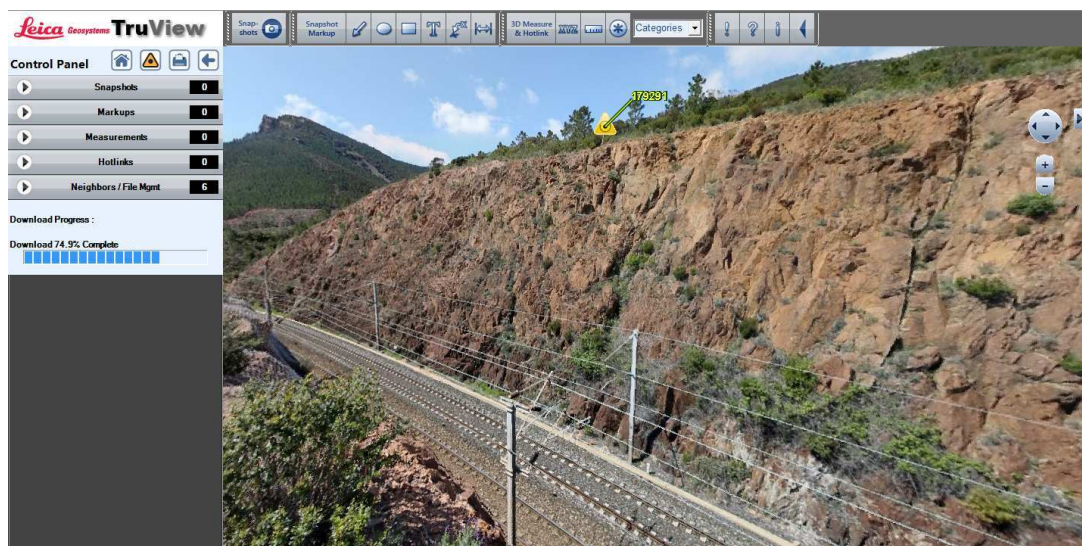


Illustration 3.8 - Extrait du Truview

3.4.1.4 Les contraintes

La méthode de lever par scanner laser 3D nécessite beaucoup de matériel pour obtenir un nuage de points de qualité, ce qui représente une contrainte forte lors de la réalisation de chantiers situés dans des zones accidentées. Toutefois, cette technique permet de réaliser les acquisitions très rapidement ce qui rend les mesures très pertinentes pour des chantiers importants (plusieurs centaines de mètres). Pour cette méthode, le traitement des données est rapide si le levé a été réalisé correctement.

3.4.2 Photogrammétrie terrestre

3.4.2.1 Protocole de levé

Nous allons effectuer deux types de relevés photogrammétriques terrestres :

- Le premier que nous appellerons « terrestre » qui sera réalisé à partir de clichés à « hauteur d'homme »
- Le second, que nous nommerons « terrestre + canne » qui représentera les relevés réalisés à l'aide de l'appareil photographique monté sur une canne télescopique. Ce dernier dispositif est utilisé pour déporter la prise de vue et ainsi faciliter l'acquisition de zones inaccessibles car situées en hauteur. Pour cela nous utilisons une tête de trépied photo et une canne télescopique Leica ou Trimble pour que l'appareil photo puisse prendre de la hauteur en étant toujours le plus possible perpendiculaire à la paroi. Le déclenchement des prises de vue se fait à l'aide d'une télécommande sans fil.

Comme pour la méthode scanner laser 3D le positionnement des cibles est une étape importante puisqu'elles permettent de recalibrer les photos entre elles. Cinq points communs minimum entre deux clichés sont nécessaires pour que les photos soient correctement positionnées. Une fois les cibles en place, elles doivent être levées. Cette étape est indispensable pour géoréférencer le levé ou plus simplement donner une notion d'échelle au projet.

Ces cibles sont des contraintes dans les étapes d'Orientation Relative (OR) et d'Orientation Absolue (OAb). La répartition des cibles doit être homogène sur l'ensemble de la paroi rocheuse. Voici un exemple de positionnement des cibles (illustration 3.8) :



Illustration 3.9 - Représentation du positionnement de cibles

Sur l'image de gauche les cibles sont bien réparties (cas idéal) tandis que sur l'image de droite elles ne permettront pas de faire un modèle correct (cas utilisé dans notre exemple en raison de l'impossibilité d'accéder aux voies). En effet, le manque de contrainte dans les parties basses et centrales de la paroi rend ces zones propices à une rotation de leur position par rapport à la crête. Le protocole de levé par photogrammétrie terrestre est présenté en **Annexe 6 : Levé photogrammétrie terrestre**.

3.4.2.2 Création du nuage de points :

Nous utilisons le logiciel *Photomodeler Scanner* pour les différents traitements des données photogrammétriques (ce logiciel est disponible à la SNCF). On distingue trois étapes importantes dans la création du nuage de points qui sont :

- L'étalonnage de l'appareil photo (orientation interne),,
- L'Orientation Relative (OR) et l'Orientation Absolue (OAb) des clichés,
- La création du nuage.

L'étalonnage de l'appareil photo permet de corriger les clichés de toutes les distorsions radiales et tangentielles pouvant altérer leur aspect. Ce processus est détaillé dans l'**Annexe 7 : Étalonnage des appareils photo**.

Le nuage de points sera créé après avoir effectué l'OR et l'OAb des photos à l'aide des cibles *Photomodeler Scanner*. Ces orientations entre les clichés permettent au logiciel de connaître le recouvrement entre les photos et de calculer les points du nuage. La mise à l'échelle du projet se fait en associant les coordonnées pixel des cibles à leurs coordonnées terrain. Après avoir réalisé ces différentes étapes nous pouvons procéder au calcul de l'OR et l'OAb afin d'obtenir le résidu maximal sur un point d'une image ; celui-ci est de l'ordre de 3 cm d'après les calculs de *Photomodeler Scanner*, ce qui est inférieur à la précision que nous souhaitons obtenir. Le détail de cette procédure est présenté dans l'**Annexe 8 : Création du nuage sous Photomodeler Scanner**.

L'illustration 3.9 présente un extrait des nuages générés :



Illustration 3.10 - Nuage de points par photogrammétrie terrestre. À gauche : Terre + canne ; À droite : Terre

3.4.2.3 Contraintes :

Les contraintes rencontrées dans la réalisation du levé et la modélisation du nuage de points proviennent des difficultés de pose et de levé des cibles *Photomodeler* (nécessité de positionner des cibles en crête de talus). Par ailleurs, l'identification et la reconnaissance de celles-ci dans le logiciel ont également été ardues (en raison du faible contraste entre les cibles et la paroi).

De plus, la reconnaissance automatique des cibles n'a pas pu être réalisée car les cibles les plus éloignées de la caméra n'étaient pas représentées par un nombre suffisant de pixels. L'algorithme de *Photomodeler Scanner* n'a donc pas été en mesure de réaliser la détection de manière autonome. Le marquage des 28 cibles a donc dû être réalisé manuellement.

3.5 Photogrammétrie aérienne (Drone)

3.5.1 Méthodologie de levé

Les opérations de mesures photogrammétriques à l'aide du drone ont été réalisées différemment des opérations terrestres. En effet, afin de se positionner dans les conditions d'auscultation les plus défavorables possibles, aucune cible permettant le recalage et le géoréférencement du nuage n'a été mise en place. L'absence de cible trouve aussi son origine dans l'impossibilité d'accéder à la plateforme ferroviaire car aucun agent de sécurité n'était disponible lors des acquisitions.

3.5.1.1 Plan de vol

Nous devons définir un plan de vol pour, d'une part, optimiser le temps de survol des voies ferrées et ainsi assurer la sécurité des biens et des personnes, et, d'autre part, optimiser les temps d'acquisitions (autonomie de la batterie de 40 minutes environ).

Ce plan de vol doit prendre en compte plusieurs éléments :

- L'autonomie de la batterie
- Les différents obstacles (caténares, arbres...etc.)
- Les conditions météorologiques (vent, pluie...etc.)
- La distance de recul de l'appareil

Nous pouvons faire sortir trois plans de vol qui pourraient être utilisés pour l'acquisition des clichés (illustration 3.10).

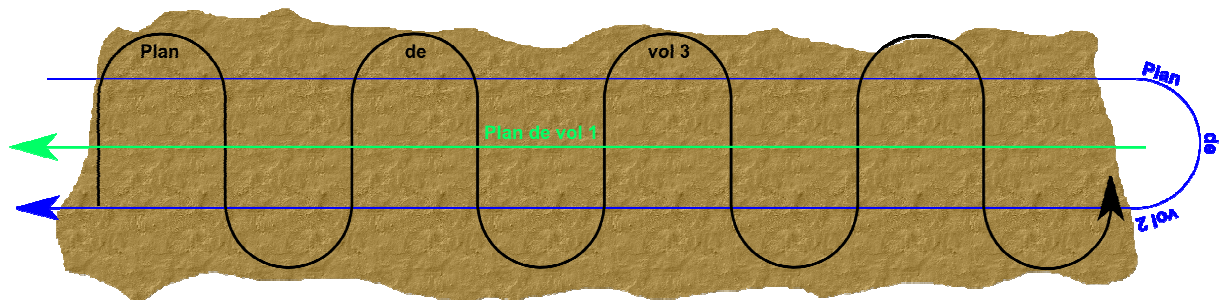


Illustration 3.11 - Représentation des trois plans de vol

Comme énoncé dans l'**Annexe 6** nous devons réaliser les clichés par couples d'aérotriangulation et couples stéréoscopiques.

La mesure de la distance séparant le drone de la paroi nous permettra de déterminer le plan de vol à privilégier :

- Plan de vol linéaire (plan de vol 1)
- Plan de vol en U (plan de vol 2)
- Plan de vol en S (plan de vol 3)

Le plan de vol linéaire est celui présentant les meilleurs avantages : en effet la batterie sera moins mise à contribution. Les manœuvres étant réduites, cela facilite le télépilotage et soulage les programmes d'autopilotage. Enfin, le nombre de clichés en est aussi réduit.

Le plan de vol en "U" solliciterait la batterie pour un seul virage contrairement à celui en "S" qui consommerait plus d'énergie. Néanmoins, il faut concilier l'autonomie de la batterie avec la réalisation de l'ensemble des clichés nécessaires. Pour cela nous avons établi des schémas de prise

de vue (illustration 3.11) pour ces deux plans de vol (flèches rouges : aérotriangulation ; flèches vertes : couples stéréoscopiques).

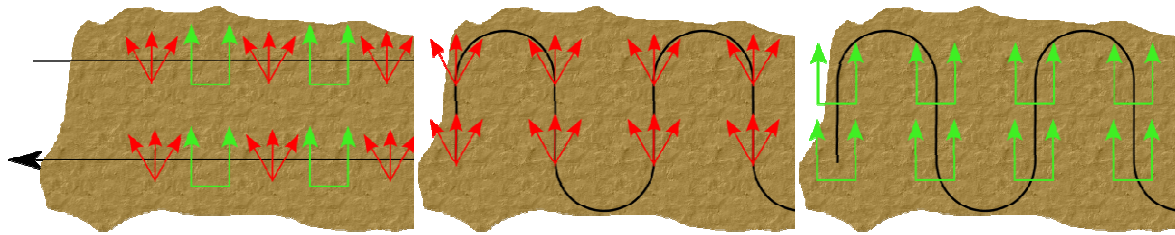


Illustration 3.12 - Position des couples d'aérotriangulation et stéréoscopique pour les plans de vol 1 et 2

Il est important de noter que pour les deux plans de vols (S et U) le nombre de clichés sera le même pour couvrir l'intégralité de la paroi rocheuse (environ 550 photos pour une paroi d'approximativement 220 m de long). En ce qui concerne le plan de vol linéaire, ce nombre sera divisé par deux car nous n'avons pas de clichés inter-bande.

3.5.1.2 Prise des photos

Le protocole pour la prise des clichés est identique à celui de la photogrammétrie terrestre énoncé dans l'**Annexe 6**. Malgré la présence de poteaux et de fils caténaux qui viennent masquer la paroi rocheuse et perturber l'acquisition photogrammétrique et géologique, il faut assurer un recouvrement minimum de 20% entre les clichés inter-bandes. Afin d'illustrer ce phénomène nous avons réalisé un schéma (illustration 3.13) modélisant les positions approximatives des deux caméras pour les plans de vol 1 et 2. Les clichés sur une même bande ont un recouvrement de 60% comme le montre l'illustration 3.14.

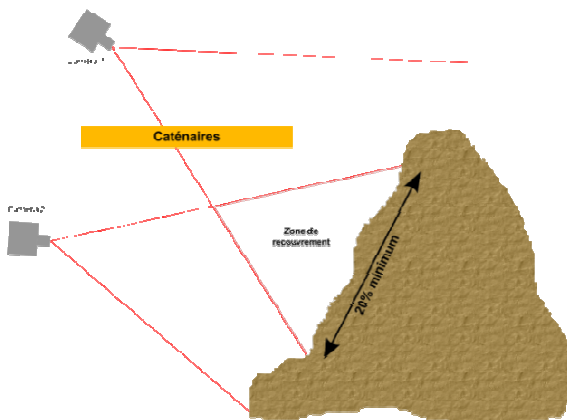


Illustration 3.13 - Position des caméras

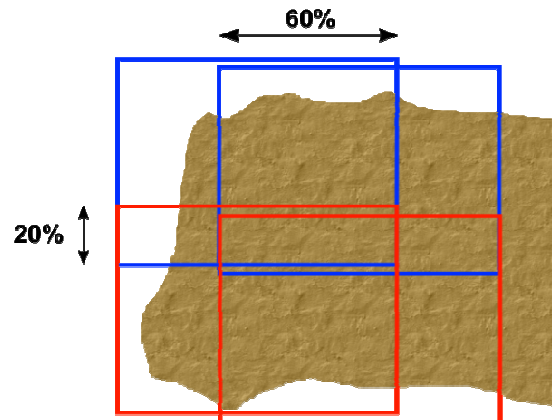


Illustration 3.14 - Recouvrement des clichés

Avec un éloignement de la paroi de 15 à 17 m nous avons donc décidé d'utiliser le plan de vol linéaire.

3.5.2 Qualité des images

Les acquisitions ont été réalisées en présence de vent ce qui a causé un effet de flou sur l'ensemble des clichés. La force du vent n'a pu être contrecarrée par la boule gyrostabilisée comme le montre l'illustration 3.15. Cet effet de flou induira automatiquement des erreurs lors de la création du nuage de points.

Pour ces acquisitions, l'appareil photographique était configuré avec une vitesse d'obturation de 1/1600 s et une mise au point à l'infini afin d'assurer la qualité des clichés. Malheureusement, comme indiqué précédemment, ces paramètres n'ont pas permis d'obtenir des clichés parfaitement nets. Afin d'essayer de réduire cet effet de flou, nous avons décidé d'augmenter la vitesse d'obturation et donc réduire le temps de pose à 1/4000 s, cependant, l'augmentation de la vitesse du vent ne nous a pas permis de réaliser les acquisitions.



Illustration 3.15 - Impression de flou sur les clichés drone

Par ailleurs ce test n'a pas pu être mené plus tard dans mon étude car le drone de la SNCF n'a pas été livré durant mon TFE. Les seules acquisitions ont donc été réalisées en présence du constructeur, ce qui ne nous a pas permis d'effectuer l'ensemble des essais et études de qualité et de précision souhaité. Nous avons néanmoins réalisé une augmentation de la vitesse d'obturation de manière théorique par calcul en considérant que nous étions dans une configuration idéale, sans vent et avec un bon ensoleillement (voir l'illustration 3.16).

En estimant que nous volons à une altitude de 30 m avec l'appareil photo Canon EOS 7D (capteur 22,4 x 14,9 mm ; vitesse d'obturation 1/4000 s ; focale 20 mm), et une vitesse maximale de 10 m.s⁻¹ le déplacement du drone pendant le temps d'obturation est de 2,5 mm.

Pour que l'image soit nette, il faut que la taille d'un pixel au sol soit supérieure au déplacement du drone. Ayant une image de sortie de 5760 x 3840 pixels, sa taille au sol est de 5,9 mm.

Nous constatons que le déplacement est plus petit que celui de la taille d'un pixel au sol. L'image est nette dans ce cas de figure idéal mais si le vent augmente, la qualité de la photo sera grandement impactée. Ce calcul théorique nous permet donc de valider notre hypothèse d'étude. Malheureusement nous n'avons pas pu mettre en pratique ce calcul ; la pertinence opérationnelle de notre hypothèse n'est donc pas validée.

3.5.3 Modélisation du nuage

Pour la création du nuage de points nous procédons de manière similaire à la méthode décrite pour la création du nuage de points par photogrammétrie terrestre. Le seul point de différence réside dans l'OAb (Orientation Absolue) car nous rappelons qu'aucun point de contrôle n'a pu être mis en place. Nous devons donc sélectionner des points préalablement déterminés (à l'aide du scanner laser) afin d'insérer une à plusieurs contraintes de distance dans le projet. Dans notre cas, deux distances (une hauteur de poteau caténaire et une distance entre deux poteaux caténares) ont été insérées pour la mise à l'échelle. Un extrait des nuages de points résultants est présenté par l'illustration 3.17.

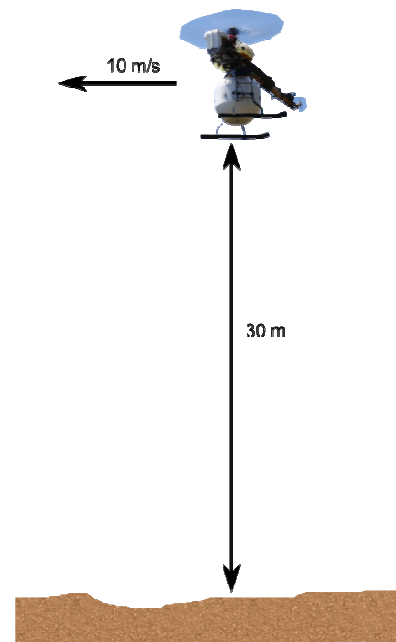


Illustration 3.16 - Schématisation du déplacement du drone



Illustration 3.17 - Nuages de points issus du drone : à gauche paroi V1 ; à droite paroi V2

3.5.4 Contraintes

La principale contrainte rencontrée est l'obtention de l'autorisation de vol auprès de la DGAC. Celle-ci est obligatoire afin d'effectuer un vol occasionnel sans le MAP (le drone du constructeur n'en disposait pas). Pour cela, nous avons présenté un dossier du projet exposant les différents problèmes qui pourraient demander un changement de scénario de vol. Dans notre cas, nous avons effectué une demande d'autorisation exceptionnelle pour les vols expérimentaux.

De plus, des contraintes opérationnelles nous ont empêchés de réaliser des acquisitions optimales :

- Les conditions météorologiques (vents violents)
- La présence de zéolite (roche volcanique principalement constituée de métaux lourds) affecte les commandes de vol en dérégulant les appareils magnétiques comme la boussole. Cela a pour effet d'entraîner un enroulement du drone (il tourne sur lui-même). Pour faire face à ce problème, le vol a été réalisé en mode manuel et non par pilote automatique.

3.6 Conclusion

L'utilisation de ces différents outils de mesure nous a permis d'identifier les difficultés opérationnelles de chacune des méthodes. En comparant les résultats obtenus, nous pourrions déterminer la précision et la qualité des données acquises à l'aide du drone. Nous allons donc mener, dans le chapitre suivant, des études qualitative et quantitative du jeu de données acquis via l'aéronef léger.

Les logiciels *Cyclone* et *Photomodeler Scanner* nous fournissent lors de la génération des nuages de points un résidu maximal ; celui-ci nous donne une idée de la qualité du nuage. Ces nuages de points vont faire l'objet de différents tests afin de connaître leur qualité a posteriori. Nous allons ainsi essayer de déterminer si la photogrammétrie par drone est tout aussi précise que la photogrammétrie terrestre ou que les acquisitions par scanner laser 3D.

Nous constatons d'ores et déjà, pour l'analyse technico-économique, des différences importantes entre les méthodes : le scanner nécessite environ deux fois plus de temps que la photogrammétrie pour l'acquisition des données.

4 Comparaisons et analyses

4.1 Comparaison qualitative (précision) et complétude

4.1.1 Choix du nuage étalon

Pour débiter la comparaison des nuages de points, il faut définir un nuage étalon, c'est-à-dire un nuage que l'on considèrera comme valeur la plus probable de l'observation. Nous choisirons le nuage issu du relevé laser en raison de son exhaustivité et de sa précision déjà étudiée par [Fievet, 2011].

Ce choix se justifie par plusieurs critères :

- Comparé aux autres méthodes, le scanner laser 3D est le seul représentant son environnement à l'échelle 1 : 1. Ainsi il retranscrit fidèlement ce qu'il mesure contrairement à la photogrammétrie qui nécessite la mise en place et la relevé de cibles pour la mise à l'échelle.
- De plus, nous n'avons pas pu positionner les cibles de façon homogène pour optimiser le calage photogrammétrique. En effet une absence de cible au centre de la paroi est constatée ce qui peut amener une mauvaise détermination du nuage dans ces zones.

4.1.2 Manipulation préalable

Les nuages de points issus du drone ne sont pas dans le même système de coordonnées que ceux du scanner car nous n'avons pas positionné les cibles de « calage » sur le terrain. Ainsi nous ne pouvons pas directement les comparer entre eux. Une étape de recalage préalable est obligatoire. Pour cela nous utilisons la fonction « *Cloud to cloud* » (nuage/nuage) à l'aide du logiciel *Leica Cyclone*. À partir de 3 points communs au minimum entre les nuages, le logiciel cherche à optimiser leur position.

Une fois cette étape remplie, un calage « *Best Fit* » avec le logiciel *3DReshaper* est effectué. Le *Best Fit* est un algorithme ICP (Iterative Closest Point) utilisé pour repositionner deux objets. D'après [C. P. Vavoulidis et I. Pitas, 1999] l'algorithme calcule la distance d'Hausdorff qui est la plus courte d'un point p à un plan X par la formule :

$$d(p, X) = \min_{x \in X} \|x - p\|$$

La distance minimale est une distance euclidienne. De ce fait, cet algorithme recalc de manière itérative le nuage étudié sur le nuage de référence.

4.1.3 Qualité des nuages

La comparaison des nuages est réalisée à l'aide du logiciel *CloudCompare*. Il permet d'étudier et de comparer l'écart type entre deux nuages. Les travaux réalisés précédemment nous ont permis de créer différents nuages de points :

- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| ➤ Scanner laser 3D | ➤ Drone V1 |
| ➤ Terrestre | ➤ Drone V2 |
| ➤ Terrestre + canne | ➤ Drone erreur (géoréférencement) |

Les nuages issus du drone sont les seuls ne possédant pas de points de calage connus en coordonnées et reposant sur des photos floues. On peut donc craindre une imprécision

d'orientations relative et absolue. L'objectif est d'évaluer cette imprécision pour connaître son impact sur le nuage.

En utilisant la fonction « *Compute cloud/cloud distance* » de *CloudCompare*, l'écart type du nuage peut être déterminée. Cette fonction calcule à partir de deux nuages, « comparant » et « comparé », deux distances.

Tout d'abord une distance moyenne qui permet une première approximation du résultat et ensuite une distance d'Hausdorff ([D. Giradeau-Montaut, M. Roux, R. Marc, G. Thibault ; 2005]). Le bruit sur un nuage peut causer un impact sur la précision d'où l'importance de nettoyer ces artefacts avant de déterminer la précision. En connaissant toutes les distances séparant les points des nuages, l'écart type « sigma » (67,5 % des valeurs) est déterminé.

Dans le nuage « Terrestre + canne », nous remarquons deux cassures assez importantes (voir cercle rouge, illustration 4.1). En comparant avec le nuage colorisé nous constatons un changement de radiométrie assez visible. Comme énoncé précédemment, *Photomodeler Scanner* utilise la radiométrie pour calculer les points du nuage. Si la radiométrie sur un cliché est totalement différente de la radiométrie des autres clichés cela produit des erreurs qui se répercutent sur la position des points dans le nuage. Afin de remédier à ce problème il est possible de retoucher les clichés (correction radiométrique).

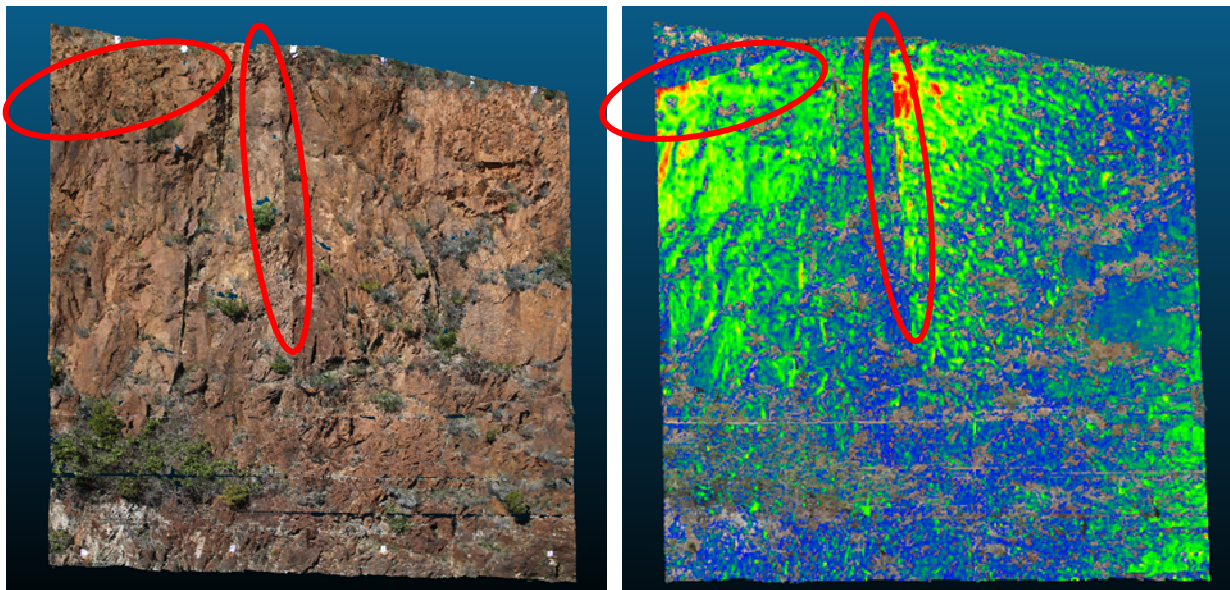


Illustration 4.1 - Impact d'une erreur radiométrique sur le nuage

En analysant plus en détail le nuage de points nous constatons que les points sont positionnés en avant du nuage de points scanner comme le montre l'illustration 4.2.

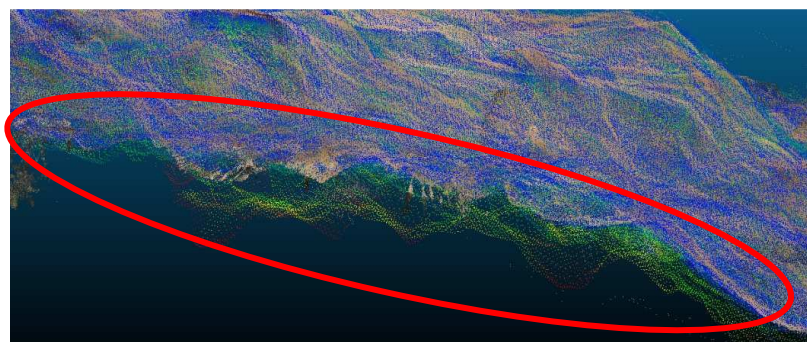


Illustration 4.2 - Aperçu de l'erreur vue du dessus

Après une correction du nuage Terrestre + canne, l'analyse peut être menée. En comparant les différents nuages à celui du scanner laser 3D et en tronquant les distances supérieures à 30 cm (artefacts non supprimés lors des opérations de « nettoyage »), nous obtenons les résultats suivants :

	Terrestre	Terrestre + canne	Drone V1	Drone V2
Précision	2,1 cm	2,3 cm	2,3 cm	2,5 cm

Tableau 4.1 - Précision à un sigma (67,5% des valeurs) des nuages de points

Nous constatons que les écarts observés sont plus faibles que la tolérance de 5 cm que nous nous étions fixée. Ce résultat donne un aperçu du rendu des acquisitions par drone. Malgré les zones de végétation présentes sur la paroi la précision n'est pas impactée.

Le nuage Terrestre (illustration 4.3) montre un écart homogène même dans les zones de végétation (cercle rouge). Ces écarts peuvent s'expliquer par le décalage temporel des acquisitions (un jour d'écart). De plus, la zone de mesure étant située dans une zone encaissée, de nombreuses rafales de vent viennent balayer le chantier. Ces rafales peuvent être à l'origine de mouvements de la végétation entre les différentes étapes de levé. Néanmoins, les écarts observés étant faibles, nous avons décidé de supprimer uniquement les points sur la végétation haute.

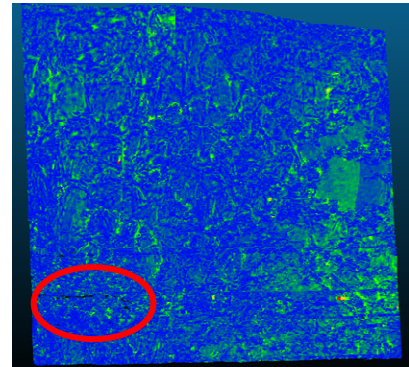


Illustration 4.3 - Nuage de points colorisé en fonction des écarts

Nous pouvons déduire de ces résultats que la « mauvaise » qualité des photos (flou) n'impacte que très légèrement la précision du nuage drone. Les éléments produisant le plus de bruit sur la qualité du nuage étant la végétation et la radiométrie des clichés.

4.1.4 Erreur de référencement

Afin de connaître l'impact de l'absence de cibles pour les acquisitions avec le drone (cas qui sera le plus fréquemment constaté dans les opérations futures car nous souhaitons réaliser le lever de zones inaccessibles) nous avons décidé de simuler une erreur de calage du nuage. Cette simulation nous permettra de déterminer si, malgré une erreur de géoréférencement voire de mise à l'échelle, les données acquises peuvent être utilisées dans le cadre d'une étude de comparaison de volume.

Nous avons donc à nouveau créé un nuage de points par corrélation épipolaire dense (CED) avec une seule distance pour mettre à l'échelle le nuage. En recalant le nuage avec *Cyclone* puis *3DReshaper* nous obtenons les résultats suivants :

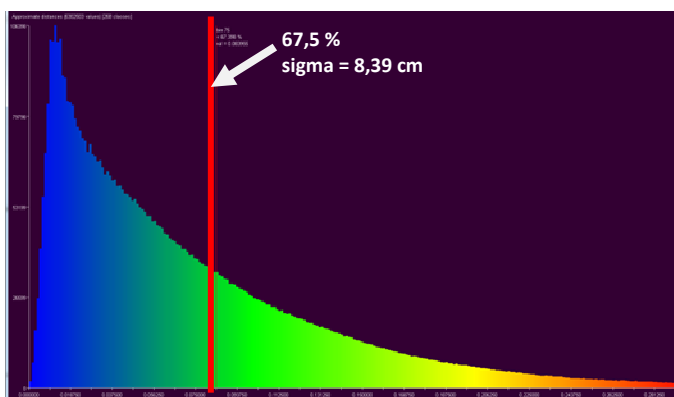


Illustration 4.5 - Histogramme de la précision des points

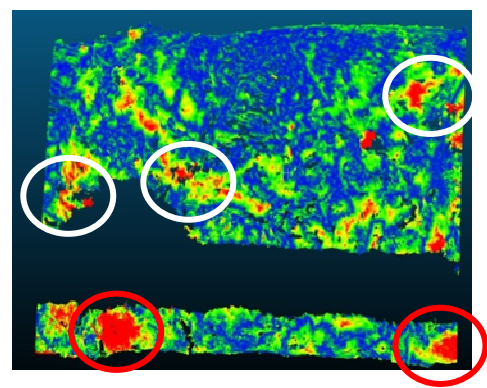


Illustration 4.4 - Position des erreurs

L'erreur de 8 cm (illustration 4.5) constatée est principalement due à la présence de végétation (qui, comme évoqué précédemment, perturbe la création des nuages de points, cercles blancs illustration 4.4) et à la présence de points calculés entre les fils caténaux (cercles rouges, illustration 4.4). Les algorithmes de CED sont fortement perturbés par la présence, dans les clichés, de zones « fines » situées dans un plan totalement différent du plan principal de l'image (cas typique des fils caténaux qui sont situés 5 m en avant du plan principal de l'image et qui ne mesurent que 3 à 5 cm d'épaisseur).

Une fois ces zones critiques retirées nous obtenons sensiblement les mêmes écarts (environ 8 cm) que précédemment, ce qui amène à penser qu'une erreur d'échelle s'est insérée dans notre calcul. Ainsi nous pouvons conclure que la mise à l'échelle du modèle avec une seule distance ne permet pas d'atteindre le critère de précision de 5 cm que nous nous étions fixés.

Pour illustrer nos propos nous pouvons constater que la partie haute du nuage est bien recalée tandis que la partie basse est complètement erronée : le nuage de point semble avoir subi une rotation par rapport à la crête de talus, précisément où se situait la distance pour la mise à l'échelle). Les résultats observés sont donc directement corrélés avec la méthode de mise à l'échelle choisie.

Afin de savoir si cette erreur est pénalisante pour le calcul de surface (nous observons ici une rotation du nuage mais la qualité relative du nuage semble assurée) nous allons comparer l'état de surface général de ce nuage avec l'état de surface du nuage lasergrammétrique (comparaison de superficie).

4.1.5 Différence de surface

Afin de connaître la superficie de l'affleurement rocheux il est conseillé de créer un maillage de la zone étudiée. Cette opération est réalisée avec *3DReshaper*.

Pour obtenir un maillage de qualité, il est indispensable de travailler de manière itérative : tout d'abord nous réalisons un maillage « grossier » (maillage avec un pas de 2 mètres) puis nous affinons petit à petit jusqu'à atteindre l'échantillonnage souhaité (5 cm). Cette méthode permet d'éviter la présence de vides dans le nuage tout en rendant possible le lissage général des zones ne présentant que très peu de points corrélés. Il convient de travailler précautionneusement pour éviter d'obtenir des nuages de points totalement aberrants (par exemple points interpolés voire extrapolés erronés). Les différences entre un maillage « brut » et un maillage itératif sont présentés dans l'illustration 4.6.

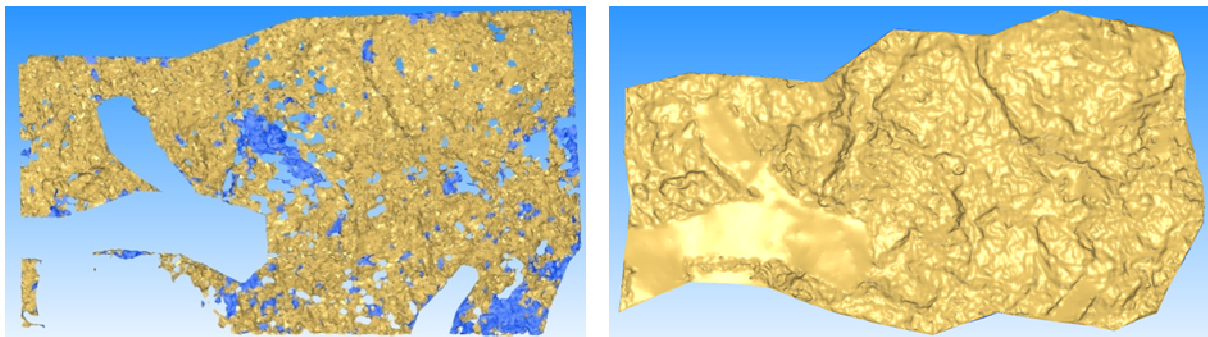


Illustration 4.6 - Gauche maillage comportant des erreurs ; Droite maillage à pas progressif

Sur l'image de gauche nous pouvons visualiser les manques dans le maillage brut (le pas d'échantillonnage trop fin ne permettant pas à l'algorithme de déterminer un maillage de qualité) ainsi que les zones possédant une orientation différente (zones de couleur bleue). Sur l'image de

droite le maillage a été calculé de manière itérative (maillage de 2 m puis de 1 m ; 0,5 m ; 0,1 m ; 0,05 m) ce qui permet d'éviter les trous et les triangles mal orientés.

À partir des maillages réalisés nous pouvons déterminer sa surface : nous obtenons 234 m² pour le scanner (couleur or, illustration 4.7) et 207 m² pour le drone (couleur rosé). Cette différence peut s'expliquer par la présence de végétation (dans le cercle vert) sur le nuage scanner (végétation non présente sur le nuage du drone car la CED n'a pas pu calculer de point dans la végétation).

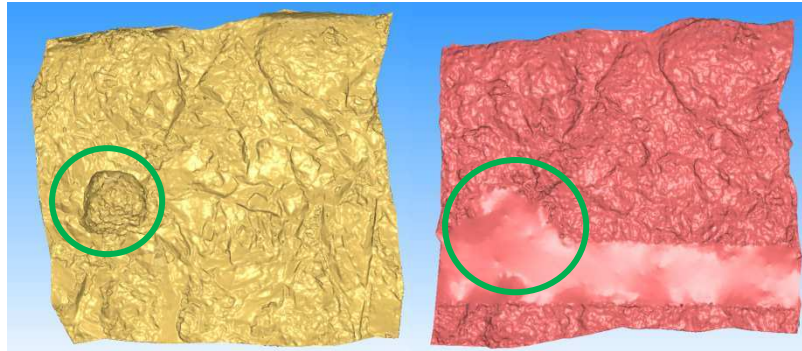


Illustration 4.7 - Maillage de végétation pour les données scanner

En retirant la végétation (nuage de points de la paroi uniquement) nous obtenons une surface de 227 m² pour le scanner (couleur or). Par ailleurs, afin d'affiner à nouveau notre analyse nous avons décidé de retirer du calcul la partie inférieure du nuage de points obtenu par le drone. En effet, comme expliqué précédemment cette partie du nuage de points a fortement été perturbée par la présence des fils caténaux (rendant impossible le calcul de CED).

En retirant cette partie sur les deux nuages de points nous obtenons 183 m² pour le laser scanner (couleur or) et 184 m² pour le drone (voir illustration 4.8). Les écarts sont donc négligeables.

Pour atteindre ces résultats, il faut porter une attention toute particulière à la qualité des nuages et réaliser une comparaison d'éléments similaires (mêmes zones de trous et mêmes limites).

Nous constatons que dans le cas de levés réalisés à l'aide du drone, seuls devront être conservés les points calculés dans des zones favorables à une bonne corrélation d'images (quelques différences de profondeur de champ, différence radiométrique des objets mesurés, ...).

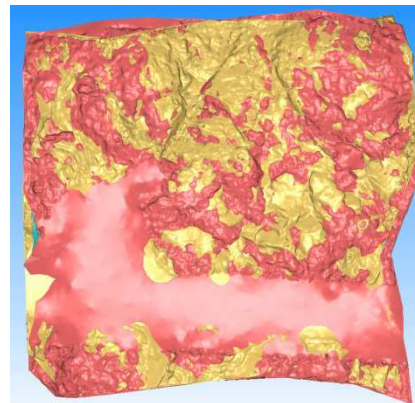


Illustration 4.8 - Superposition des maillages avec retrait des zones de végétations

L'écart de 1 m² permet d'affirmer que les 2 surfaces sont identiques, ce qui signifie que la forme de la paroi est respectée. Ainsi, l'OAb avec cibles peut être évitée mais reste conseillée car elle permet un contrôle rapide de la qualité des données acquises. Nous obtenons une erreur inférieure à 1 % pour une surface de 183 m².

Cette méthode d'orientation absolue « rapide » peut également être utilisée pour obtenir un visuel du nuage de points. Néanmoins, si le nuage de points n'est pas bien orienté, les pentes seront fausses et les géologues ne pourront pas réaliser une étude de qualité. Bien que cette méthode de référencement permette d'obtenir des résultats satisfaisants il est recommandé durant l'acquisition des données de les géoréférencer pour les rendre exploitables par tous.

4.1.6 Qualité par rapport à l'orientation de la caméra

Lors de la phase d'acquisition l'orientation de la caméra est un point important car c'est elle qui détermine la zone qui pourra être calculée. Ainsi, si l'appareil photo est mal positionné la corrélation des points situés en dessous des surplombs ou de petits blocs rocheux n'est pas réalisable.

Nous pouvons observer (sur l'illustration 4.9) les nuages de points scannés et drone du côté V2. Le nuage clair présentant des zones incomplètes (cercle rouge) a été acquis à l'aide du drone. La zone cerclée représente de petits blocs de pierres masqués lors de la prise des clichés par l'aéronef. Les photos étant prises en vue plongeante, il nous était impossible de mesurer et de modéliser cette partie de la paroi.



Illustration 4.9 - Vue du dessous de la paroi V2, aperçu d'un nuage parsemé

Cette absence de données peut être corrigée par l'utilisation combinée de données aériennes et terrestres. Pour des parois importantes (plus de 20 m de hauteur) il sera nécessaire de combiner les données terrestres (scan ou photo) avec les données acquises par le drone. Ainsi, le drone trouve donc naturellement sa place dans les processus d'acquisition.

4.1.7 Comparaison de profils

Afin d'approfondir notre analyse des nuages de points créés, nous allons maintenant réaliser des coupes verticales et horizontales. Ces coupes vont permettre de vérifier si le nuage de points acquis à l'aide du drone n'est pas soumis à des déformations causées par la méthode de géoréférencement. Pour réaliser cette opération nous devons créer un maillage avec *3DReshaper* et extraire les profils créés pour les exploiter sur *AutoCAD*.

Une fois le maillage créé avec *3DReshaper* nous avons déterminé des zones stratégiques pour la réalisation de notre étude comparative :

- Côté V1
 - une zone de végétation (B_1-B_1' et C_1-C_1' , cercle vert),
 - une zone présentant de fortes cassures (A_1-A_1')
 - et la coupe D_1-D_1' pour une zone relativement homogène.
- Côté V2
 - une zone de végétation (C_2-C_2' , cercle bleu),
 - une zone présentant des manques dans le nuage de points (B_2-B_2' et D_2-D_2')
 - une zone présentant de fortes cassures (A_2-A_2')

La représentation de ces coupes est schématisée dans l'illustration 4.10.

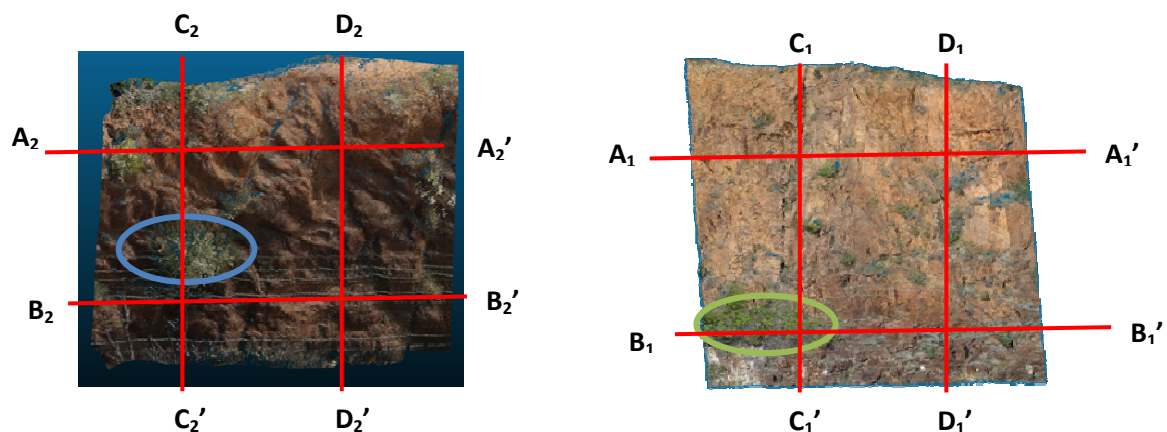


Illustration 4.10 - Position des coupes ; Droite paroi V2 ; Gauche paroi V1

Cette configuration a été choisie pour étudier l'influence des déformations sur les composantes verticale et horizontale du nuage de points.

Dans le but de faciliter les travaux d'analyse des écarts, nous allons rabattre les points des polygones créés sur une droite afin de déterminer directement des écarts longitudinaux, transversaux et en altitude facilement analysables sur le terrain. Cette distance de rabattement sera appelée « distance transversale ».

L'illustration 4.11 est une représentation de la zone vue du dessus pour aider à la compréhension des graphiques.

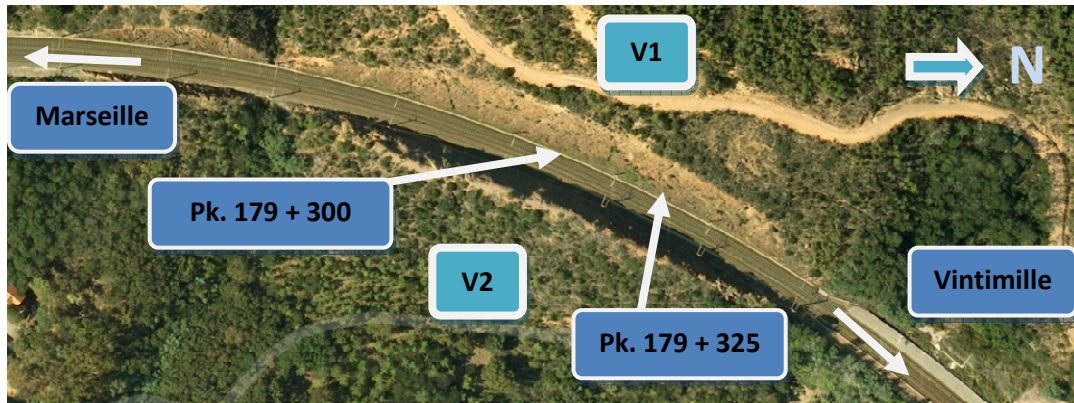


Illustration 4.11 - Photo aérienne pour la mise en situation des coordonnées ferréolocalisées - Source : Google Map

Ainsi en étudiant les graphiques suivants, nous pouvons détecter et comprendre rapidement si les écarts constatés supposent un basculement vers la voie ou vers le talus. Ces écarts sont donc nettement plus faciles et pratiques à analyser que des écarts planimétriques (être capable de visualiser l'axe des X et l'axe des Y sur le terrain peut parfois se révéler ardu).

4.1.7.1 Cas de la voie V1

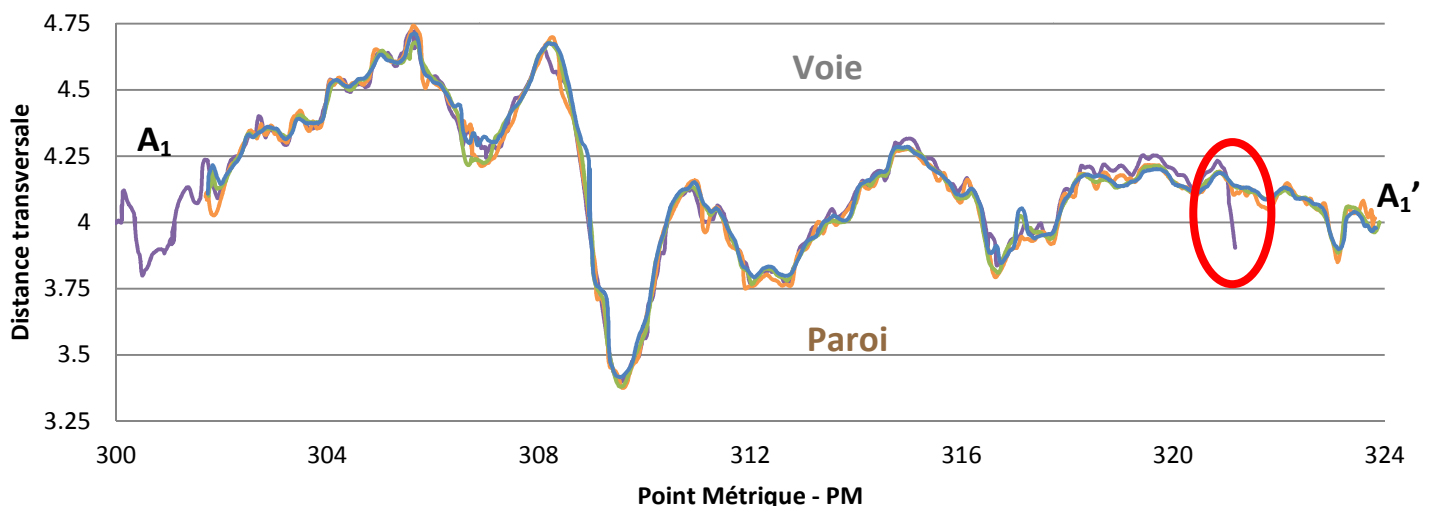
Tous les graphiques de ce paragraphe sont constitués sur la même trame et respectent la légende ci-contre :

Légende :

- Drone
- Scan
- Terrestre
- Terrestre + canne

La coupe A₁-A₁' :

Coupe A₁-A₁' côté V1 (m)



Graphique 4.1 - Coupe A₁-A₁' côté V1
43/93

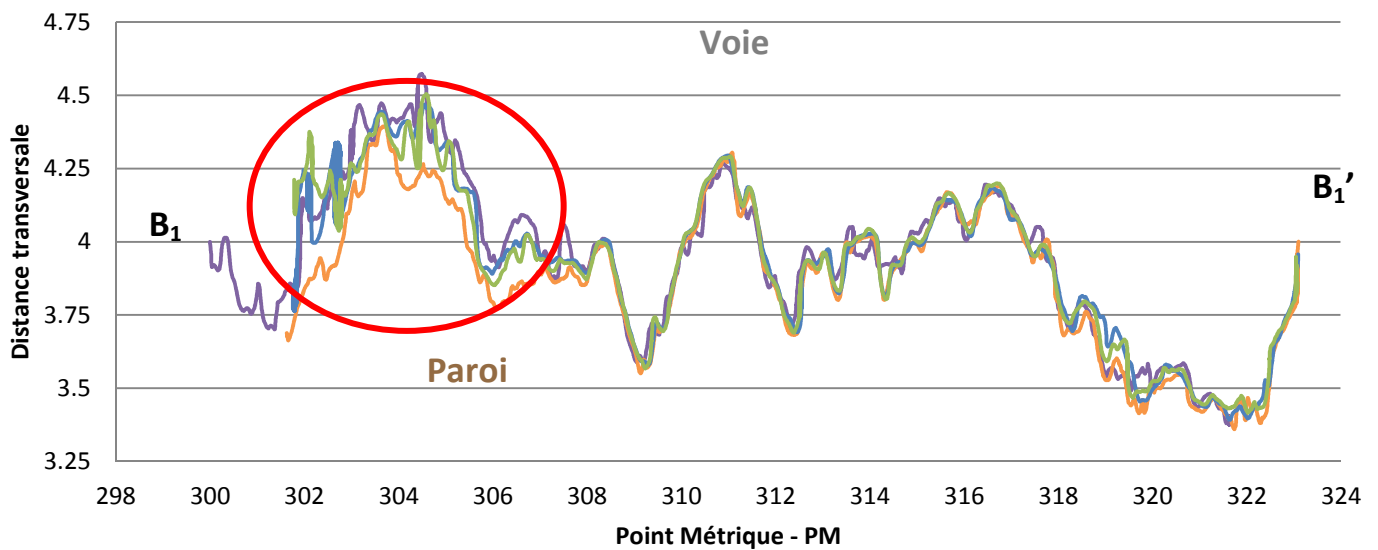
Nous remarquons une cohérence d'ensemble des différents profils. Un écart important est malgré tout constaté sur les données issues du levé à l'aide du drone (cercle rouge). En regardant le maillage nous remarquons des erreurs en bordure (cf. illustration 4.12). Ces erreurs sont dues à une extrapolation du maillage lors de sa création sous *3DReshaper* (création d'un triangle « rentrant » à l'intérieur de la paroi). Cette erreur de maillage se retrouve sur la courbe violette. Ces écarts sont uniquement causés par la création du maillage (interprétation et extrapolation des nuages de points) ; ils n'impactent pas la précision générale des nuages de points créés.



Illustration 4.12 -
Excédant de maillage

Coupe B_1-B_1' :

Coupe B_1-B_1' côté V1 (m)



Graphique 4.2 - Coupe B_1-B_1' côté V1

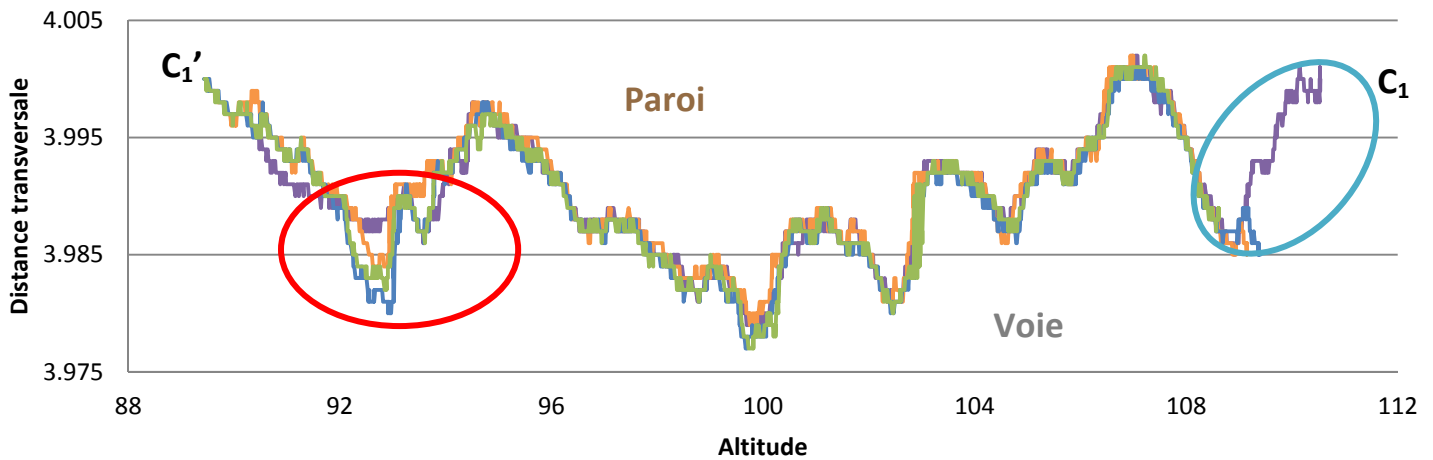
Une zone est fortement bruitée pour les quatre polygones (cercle rouge) en raison de la présence d'un buisson au niveau de la paroi (illustration 4.13). Comme évoqué précédemment la présence de végétations dégrade la qualité des calculs de corrélation d'image. De plus, les acquisitions drone ayant été réalisées un mois après les acquisitions lasergrammétriques, la morphologie du buisson a pu être modifiée (pousse).



Illustration 4.13 - Perturbation des
nuages par la végétation

Coupe C₁-C₁' (coupe verticale) :

Coupe C₁-C₁' côté V1 (m)



Graphique 4.3 - Coupe C₁-C₁' côté V1

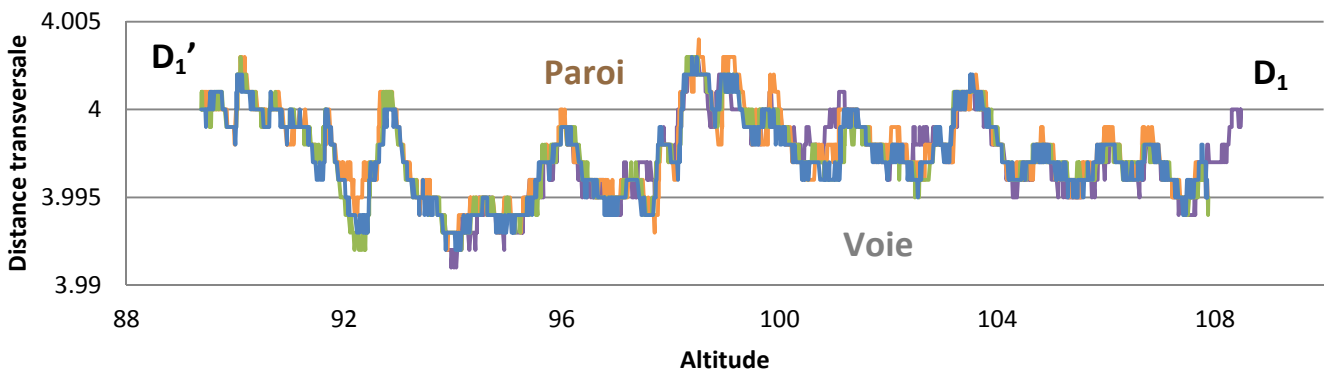
Nous constatons deux écarts (cercle rouge et bleu).

Le cercle rouge concerne la zone de végétation (voir illustration 4.13) ; le cercle bleu représente quant à lui les écarts créés par la différence de point de vue lors de l'acquisition des données. Le drone étant en hauteur, nous obtenons des données en crête de paroi qui ne pouvaient être acquises par les mesures terrestres classiques. Outre ces deux écarts facilement explicables, nous constatons que les nuages de points se superposent en tout point et sont donc cohérents. Afin de faire ressortir les écarts, nous avons modifié l'échelle verticale (étendue de 3 cm).

Coupe D₁-D₁' :

Cette coupe nous montre qu'une zone sans végétation permet d'obtenir des nuages de points sans artefacts ou écarts. Cette remarque valide la pertinence technique des acquisitions par drone.

Coupe D₁-D₁' côté V1 (m)



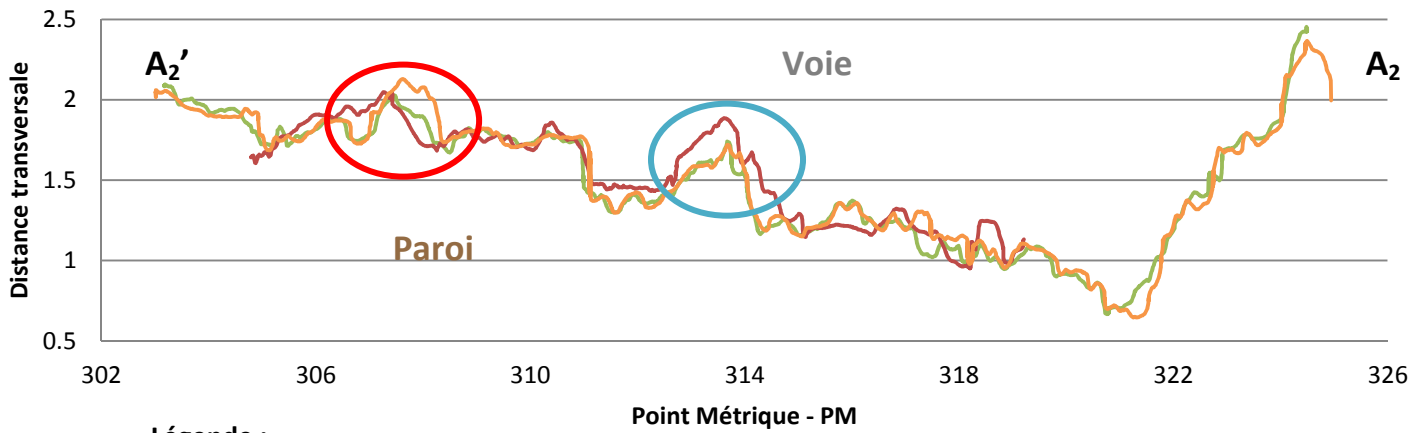
Graphique 4.4 - Coupe D₁-D₁' côté V1

4.1.7.2 Cas de la voie V2

Sur cette zone nous avons trois nuages de points (scan, drone bon et drone erreur). Afin de faciliter la lecture des écarts, nous avons mis en place une légende identique pour l'ensemble des graphiques.

Coupe A₂-A₂' :

Coupe A₂-A₂' côté V2 (m)



Légende :

- Drone Bon
- Drone erreur
- Scan

Point Métrique - PM
Graphique 4.5 - Coupe A₂-A₂' côté V2

Les données « drone bon » se superposent parfaitement avec les données scanner. Les données « drone erreurs » présentent des écarts importants dus à l'erreur de référencement présentée en partie 4.1.4.

Les écarts observés sur les différents nuages s'expliquent à nouveau par la présence de végétation (cf. illustration 4.14). Cette remarque confirme qu'il est indispensable de travailler à partir de nuages de points préalablement filtrés pour éviter toute erreur d'interprétation.

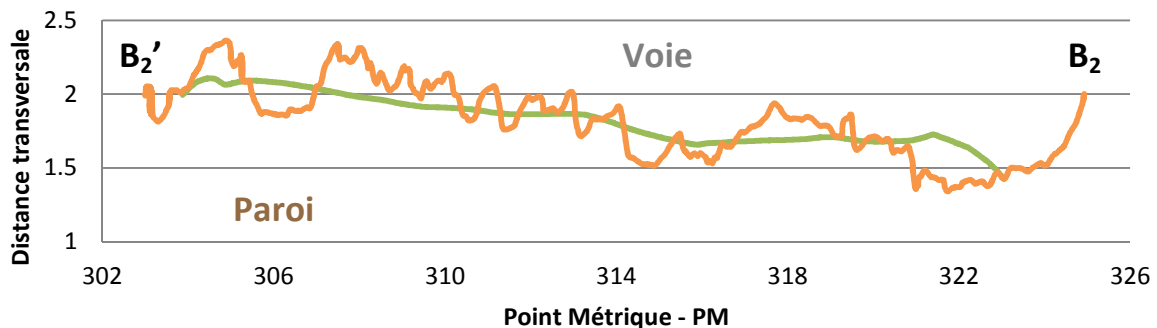
L'écart constaté au niveau de la zone entourée en rouge provient de l'erreur de l'OAb du nuage « drone erreur ». Cette erreur est d'autant plus importante que les formes de la paroi sont complexes (cercle bleu).



Illustration 4.14 - localisation des erreurs

Coupe B₂-B₂' :

Coupe B₂-B₂' côté V2 (m)



Graphique 4.6 - Coupe B₂-B₂' côté V2

Les écarts importants constatés ici proviennent des difficultés de calcul du nuage de points pour l'algorithme de CED en raison de la présence des fils caténaux. Le nuage de points créé dans cette zone est fortement entaché d'erreurs voire de lacunes. Ainsi, lors du maillage sous *3DReshaper*,

une forte interpolation du maillage (en raison de l'absence de points) a été réalisée causant la création d'un maillage « plat » comme le montre l'illustration 4.15.

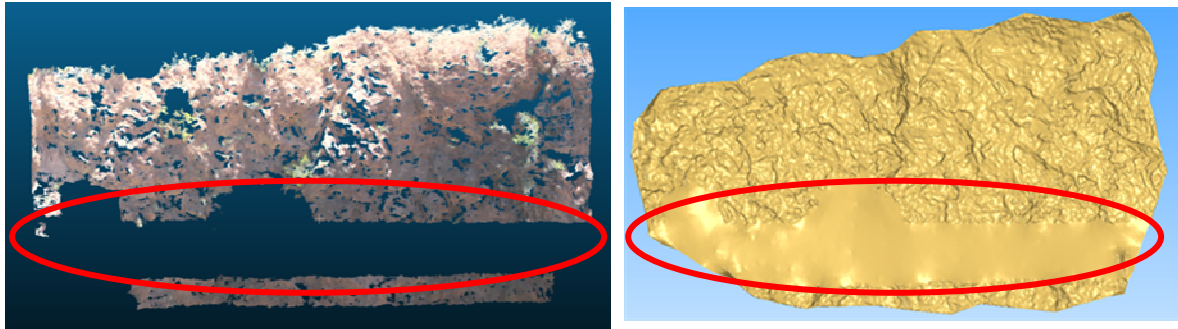
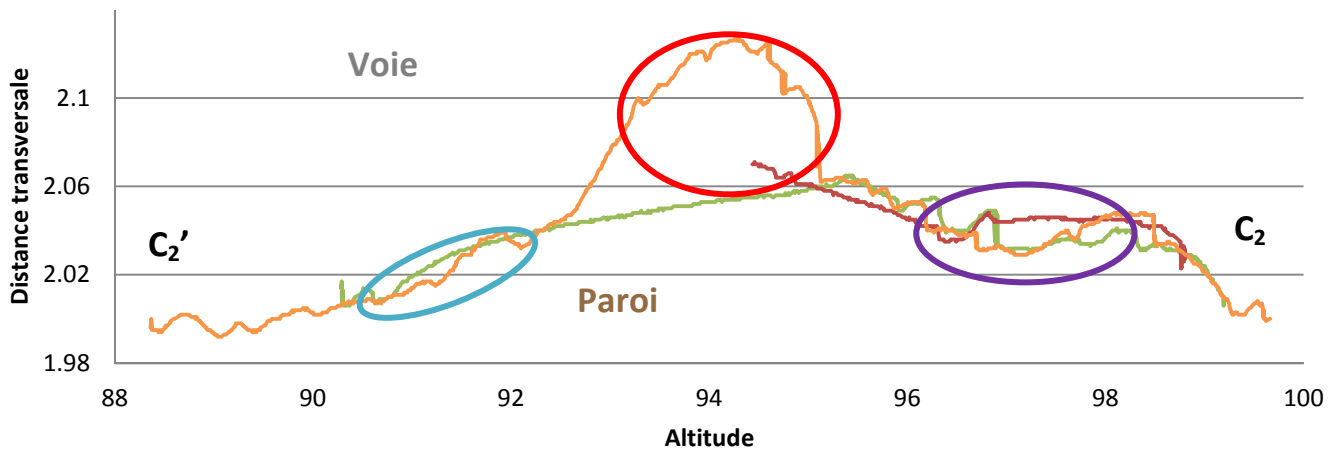


Illustration 4.15 - Manque de corrélation sur la zone des caténaires - extrapolation d'un maillage plat

Coupe C₂-C₂' :

Coupe C₂-C₂' côté V2 (m)



Graphique 4.7 - Coupe C₁-C₁' côté V2

Nous constatons de nombreux écarts entre les différents nuages de points. Ces écarts sont principalement dus à la présence de végétation (zone rouge et violette, illustration 4.16) ce qui confirme à nouveau les conclusions énoncées précédemment.

De plus, aucune information n'est obtenue au niveau de la zone des caténaires (zone bleue) ce qui conforte les constats d'analyses émises précédemment.

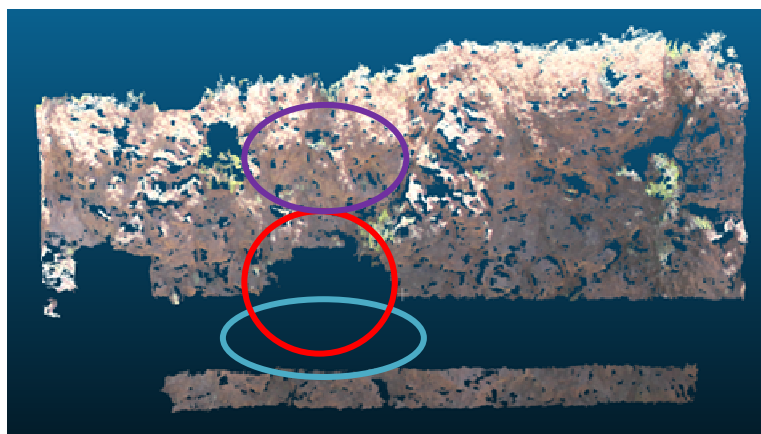
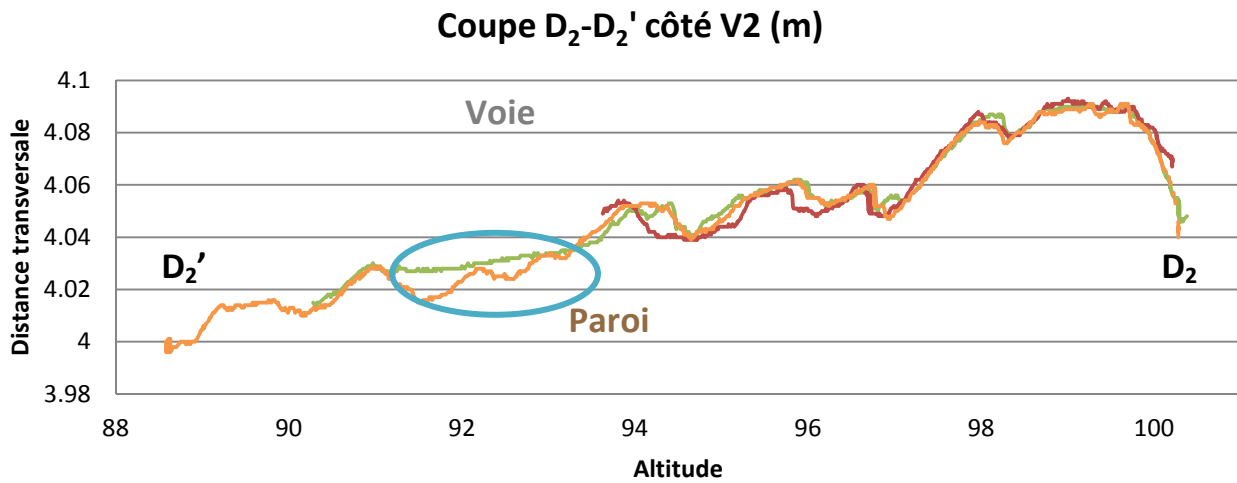


Illustration 4.16 - Positionnement des écarts sur la paroi V2

Coupe D_2-D_2' :

Les écarts observés (cercle bleu) sont encore une fois causés par la présence de caténaïres empêchant les calculs de corrélation dense d'images.

Néanmoins le profil global de cette coupe est sensiblement identique pour les 3 méthodes de mesure. Nous pouvons donc en déduire que les différentes méthodes de mesures et de calculs peuvent être associées dans le cadre de projets de grande ampleur.

4.1.8 Comparaison d'un point de vue géologique

Les travaux de thèse de Pierre ASSALI sur la *Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire (2012)* ainsi que le travail de fin d'études de Marie-Laure TROCHON sur *l'Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d'images pour l'étude des ouvrages rocheux (2012)*, ont permis de valider la pertinence technique de l'utilisation de données 3D denses pour l'analyse géostructurale d'une paroi rocheuse.

Nous souhaitons savoir si cette analyse pourrait s'appliquer aux données drone. Après avoir validé la cohérence des nuages de points acquis à l'aide du drone, nous allons donc maintenant nous concentrer sur la réalisation de l'étude structurale à partir des nuages de points acquis par drone. Si cette analyse fonctionne, nous aurons à la fois validé la pertinence technique des acquisitions par drone pour la création des nuages de points et pour leur analyse géologique.

Dans le paragraphe 4.1.6 nous avons mis en évidence la présence d'un nuage drone incomplet en raison de la position de prise de vue. Nous allons étudier dans ce paragraphe l'influence de cette lacune sur l'analyse géostructurale. L'analyse est faite sur une partie de la paroi. À l'aide du logiciel *GAIA GeoRoc* créé par Pierre ASSALI pour sa thèse, nous traiterons le nuage Drone V1 et « terrestre ».

4.1.8.1 Traitement des nuages

L'analyse géologique se base sur l'orientation des faces de la paroi, d'où la nécessité de connaître la normale en chaque point. Cette information, directement calculée lors de la réalisation de levés lasergrammétriques, n'est pas disponible dans les nuages issus de *Photomodeler*. Il convient alors de les calculer en utilisant le logiciel *CloudCompare*.

4.1.8.2 Analyse géostructurale

Le logiciel *GAIA GeoRoc* se présente en deux parties comme le montre l'illustration 4.17.



Illustration 4.17 - Logiciel GAIA GeoROC

- Une approche semi-automatique qui consiste à calculer les différentes « famille d'orientations » de roches en fonction des normales. Ces familles regroupent les points d'orientation identiques.
- Une approche manuelle qui utilise « l'image solide ». Comme le mentionne [Assali, 2012], cette technique permet de faciliter l'accès à la manipulation des données tridimensionnelles qui sont généralement manipulées par un public compétent dans ce domaine. L'objectif est de faciliter leur utilisation pour un public non spécialiste. L'utilisation « d'images solides » servira à associer les données lasergrammétriques ou photogrammétriques aux données photographiques. Cette combinaison projetera un ensemble de points 3D (obtenu par scanner ou par CED) sur une image 2D coréférencée.

En me référant au mémoire de mi-thèse de Pierre ASSALI, [Bornaz et Dequal, 2003a] et [Bornaz et Dequal, 2003b], l'image solide est la superposition des trois couches radiométriques de l'image (Rouge, Vert et Bleu) et d'une quatrième avec les informations géométriques. Ces dernières contiennent les distances spatiales entre le centre de prise de vue et le point terrain. L'illustration 4.18 montre la superposition des différentes couches de données.

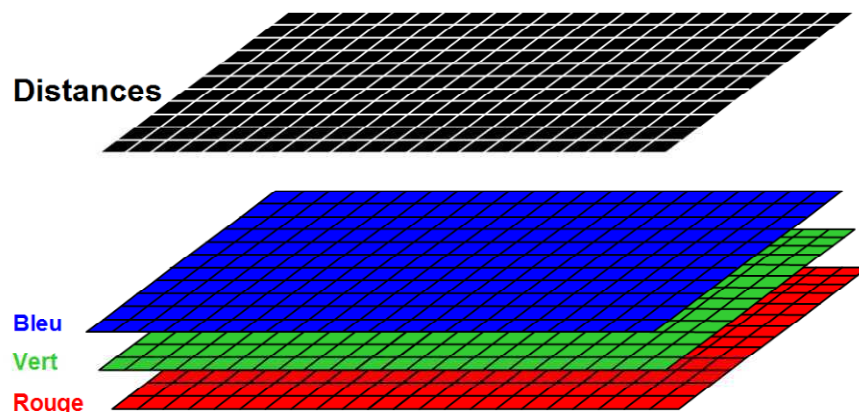


Illustration 4.18 - Image solide : 3 matrices de couleur et 1 matrice de distance - Source : P. ASSALI

➤ **Approche semi-automatique :**

Lors du chargement du nuage de points un « *Canevas de Schmidt* » est calculé. Cet outil des géologues sert à déterminer la densité de répartition des données sur une sphère. Le canevas a deux moyens de représentation : hémisphère supérieur et hémisphère inférieur. Les géologues utilisent par convention l'hémisphère inférieur pour leur analyse. Nous avons donc réalisé l'analyse semi automatique pour les données issues du levé drone et les données issues du levé par photogrammétrie terrestre. Le canevas de Schmidt résultant est présenté dans l'illustration 4.19.

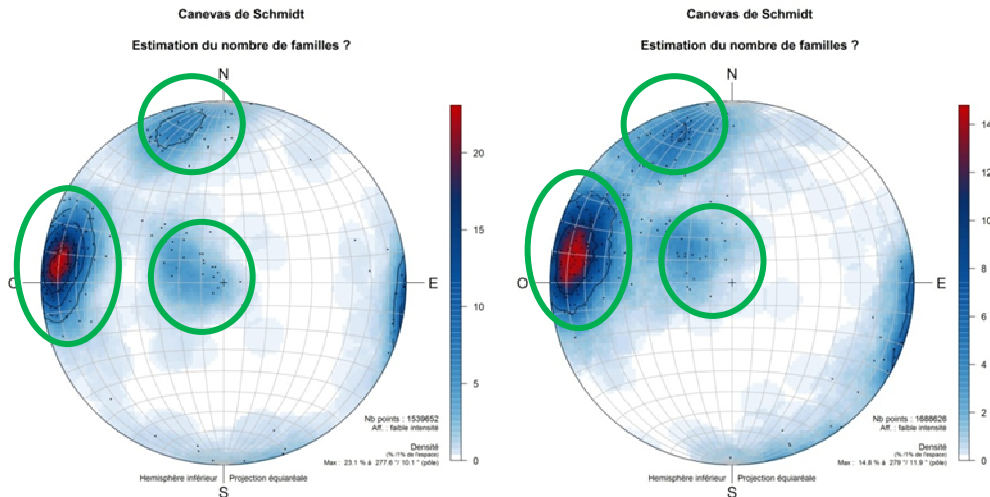


Illustration 4.19 - Canevas de Schmidt ; à Gauche les données Terrestre ; à Droite les données Drone

Au premier abord, nous remarquons que les données sont quasiment similaires. La densité est plus marquée sur les données du drone et peut s'expliquer par le nombre de points du nuage. Le nuage du drone ayant 1 700 000 points et le terrestre 1 500 000. Trois zones sur ce canevas sont ressorties (cercles verts), elles représentent trois orientations de roches. Après avoir déterminé le nombre de familles de roches, il est possible de classier les points du nuage en gardant ce critère.

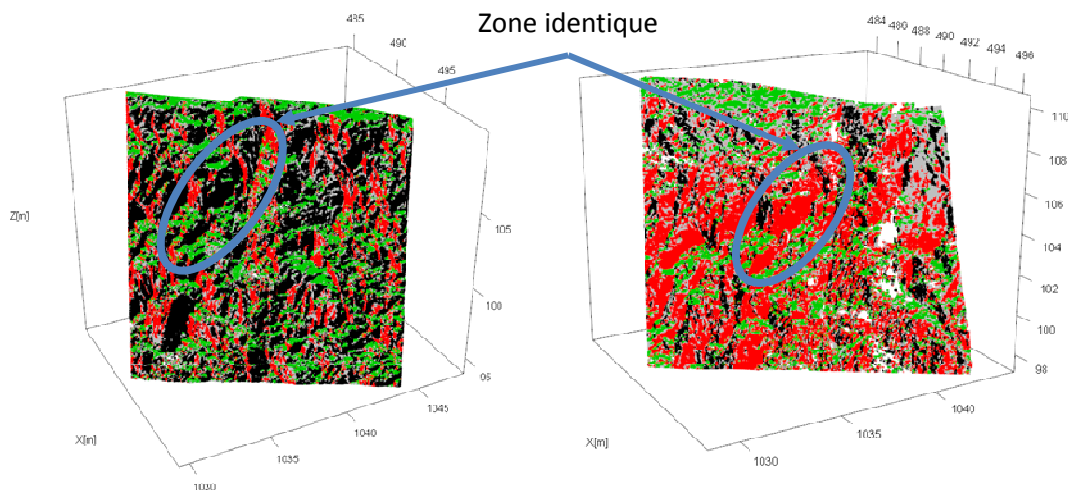


Illustration 4.20 - Colorisation des points par orientation ; de gauche à droite : Terrestre et Drone

L'illustration 4.20 représente la classification des trois orientations de roches sur les nuages de points « terrestre » et « drone ». L'attribution des orientations, ainsi que la détermination de la couleur de chacune, est faite de manière automatique. Ainsi, les couleurs retenues pour chaque nuage sont différentes c'est pourquoi nous présentons ci-dessous un tableau de correspondance :

Famille	Terrestre	Drone
1	Noire	Rouge
2	Rouge	Noire
3	Verte	Verte

Tableau 4.2 - Signification des couleurs pour les deux jeux de données

Les zones de recouvrements des familles sont identiques. Cette première étape nous amène à penser que les données drone sont cohérentes. Nous allons maintenant aborder l'approche manuelle du logiciel qui a principalement été développé par Antoine GOZE pour son TFE, en collaboration sur le projet de thèse.

➤ **Approche manuelle :**

Dans cette étape les données photogrammétriques sont combinées à des photos géoréférencées. Comme expliqué précédemment, cette approche est un outil servant à établir une analyse géostructurale à partir « d'images solides ». Le géoréférencement des clichés peut se faire de différentes manières.

- *Photomodeler Scanner* géoréférence les caméras pendant les premières phases de l'orientation relative et absolue.
- *3DReshaper* géoréférence les clichés pendant la texturation du maillage. Une fois ces éléments renseignés dans le logiciel les orientations de roche se superposent aux photographies comme le montre l'illustration 4.21.

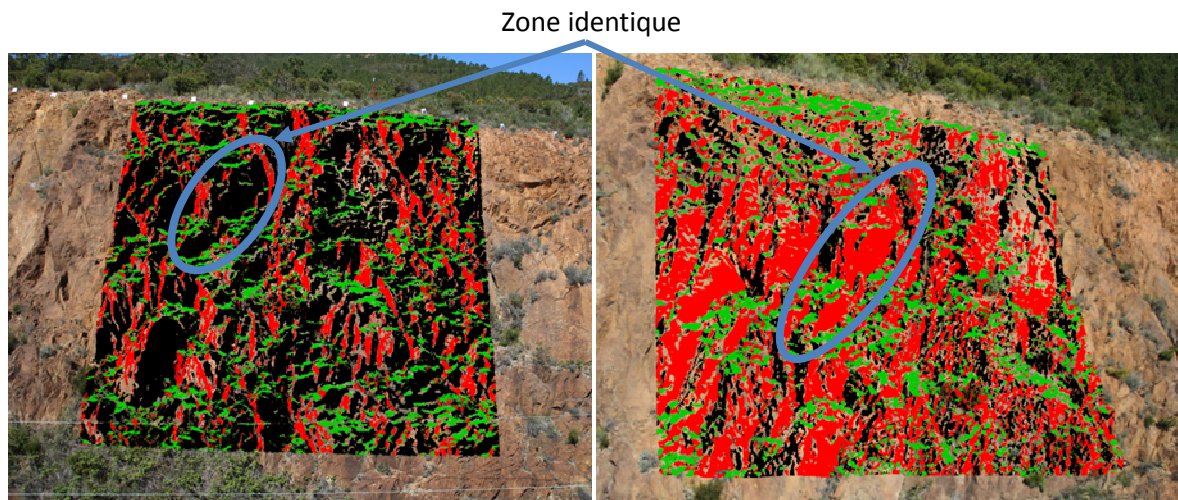


Illustration 4.21 - Création de l'image solide ; gauche à droite : Terrestre et Drone

La superposition des deux couches de données est cohérente ce qui permet d'en déduire qu'elles sont exploitables et pertinentes. Elles peuvent ainsi être utiles à plusieurs métiers, ce qui rend les données drone polyvalentes.

4.1.9 **Conclusion**

Atteignant une précision de 2,5 cm pour une précision souhaitée de 5 cm, les données drone sont pertinentes sur les plans qualitatif et quantitatif. Ce système de mesure peut être utilisé pour des chantiers de grande ampleur néanmoins ces données ne sont pas complètes en raison de l'altitude de vol du drone (impossibilité de mesurer des éléments situés au niveau de surplombs). La solution est alors de combiner cette méthode avec des données scanner ou photogrammétriques terrestres pour palier ce phénomène.

La validité technique de l'utilisation du drone étant avérée, nous étudierons dans la prochaine partie sa pertinence économique.

4.2 Analyse technico-économique

Le développement d'une nouvelle méthode dans une entreprise nécessite une étude technico-économique pour évaluer son intérêt, ses gains et son coût par rapport aux techniques déjà existantes. L'évaluation se fait en analysant les durées d'acquisition et de traitement relatives à chaque méthode. Les études de [Fievet, 2011] et [Tronchon, 2012] ont prouvé que la lasergrammétrie et la photogrammétrie terrestre permettent de réduire de respectivement 16 et 8% le coût d'un projet de confortement. La partie qui suit vise à déterminer le coût de l'utilisation d'un drone par rapport aux méthodes lasergrammétiques et photogrammétiques sur le levé de Le Trayas.

4.2.1 Phase d'acquisition

La durée de la phase d'acquisition varie en fonction de la méthode. Ici nous allons mettre en évidence le temps d'acquisition pour le levé à l'aide du scanner laser, de la photogrammétrie terrestre et de la photogrammétrie aérienne par drone sur la zone de levé de Le Trayas. Le tableau 4.3 détaille le calcul du coût par méthode.

	Méthode lasergrammétrie	Méthode photogrammétrie terrestre	Méthode photogrammétrie aérienne par drone
	1 expert géologue et 1 annonceur		
Personnel	2 techniciens topographes (70 €/h/pers)	2 techniciens topographes	2 techniciens topographes (dont un formé à l'utilisation d'ULM)
Temps	2 jours (8h x 2)	Une demi journée (4h)	Une demi journée (4h)
TOTAL	2 240 €	560 €	560 €

Tableau 4.3 - Coût d'acquisition des données

Nous constatons que les coûts des opérations photogrammétiques terrestre et aérienne par drone sont similaires et représentent 25% du coût de la méthode lasergrammétrie. Ces résultats ne sont pas étonnants car la prise d'une photo est rapide, contrairement à un scan prenant en compte le levé de cibles de calage.

4.2.2 Coût de déplacements

Le déplacement est un poste de dépenses à ne pas négliger, il est fonction de l'éloignement du chantier. Il comprend le coût horaire des agents durant le déplacement mais également l'essence, le péage, la location de voiture, etc.

Pour les trois méthodes un déplacement en voiture s'impose en raison des nombreux outils et matériel à transporter. Le tableau 4.4 établit le coût de ce déplacement :

	Méthode lasergrammétrique	Méthode photogrammétrique terrestre	Méthode photogrammétrique aérienne par drone
Personnel	1 expert géologue		
	2 techniciens topographes	2 techniciens topographes	2 techniciens topographes (dont un formé à l'utilisation d'ULM)
Temps	2 jours		
TOTAL	3 800 €	3 800 €	3 800 €

Tableau 4.4 - Coût de déplacement

Le coût de déplacement pour les différentes méthodes est donc identique.

4.2.3 Traitement

La phase de traitement représente un coût variable selon le nombre d'agents mobilisés. Dans le cas de la photogrammétrie, la calibration de l'appareil photo est incluse dans notre calcul. Pour cette estimation plusieurs facteurs sont à prendre en compte :

- L'expérience de l'opérateur sur les logiciels
- La quantité de données à traiter (fonction de l'étendue du chantier)
- Les précisions et résolutions que nous souhaitons atteindre

Le tableau 4.5 regroupe ces dépenses :

	Méthode lasergrammétrique	Méthode photogrammétrique terrestre	Méthode photogrammétrique aérienne par drone
Phase Avant Projet (AVP)			
Nature des traitements	Calcul de levé tachéométrique		
	Traitements des nuages de points (consolidation, texturation, géoréférencement, truvieview)	Calibration de l'appareil photo Génération du nuage de points géoréférencé	Calibration de l'appareil photo Génération du nuage de points
Personnel	1 technicien topographe		
Temps	0.5 jour	1 jour	1 jour
Coût	320 €	760 €	760 €
Phase Projet (PRO)			
Nature des traitements	Mise en place d'un solution de confortement à partir du nuage 3D		
Personnel	1 technicien topographe		
Temps	1 jour		
Coût	2 280 €	2 280 €	2 280 €
TOTAL	2 600 €	3 040 €	3 040 €

Tableau 4.5 - Coût de traitement des données

Le traitement plus long en photogrammétrie cause un surcoût de 17% par rapport au traitement lasergrammétrique.

4.2.4 Coût d'amortissement

L'amortissement est un élément important à considérer pour la pertinence de l'étude. Il doit être calculé à la fois pour le matériel et les logiciels. Ces amortissements linéaires se font sur une base fiscale de trois ans.

4.2.4.1 Matériels

Pour le matériel, nous disposons de :

- Deux scanners lasers
- Deux appareils photos reflex
- Un tachéomètre
- Un drone

Le tableau 4.6 montre l'amortissement des matériels listés ci-dessus pour une base fiscale de trois ans. Pour ce calcul nous avons estimé les durées d'utilisation de chaque instrument pour l'ensemble des opérations topographiques réalisées par la division (auscultations d'ouvrage en terre, d'ouvrages d'art, levés topographiques, ...). Certaines données présentées sont issues des mémoires de [Trochon, 2012] et [Fievet, 2011]. Les heures sont issues d'une étude statistique des travaux effectués sur 3 ans, celui du drone est une estimation.

	Coût d'achat	Durée d'utilisation sur 3 ans	Coût horaire
CANON EOS 7D avec objectifs associés	2 250 €	975 h	2 €/heure
CANON EOS 5D Mark III avec objectifs associés	3 900 €	975 h	4 €/heure
Scanner laser Leica C10 ou HDS 7000	80 000 €	1 950 h	41 €/heure
Tachéomètre Trimble S6	30 000 €	2 925 h	10 €/heure
Drone	60 000 €	1 400 h	43 €/heure

Tableau 4.6 - Coût d'amortissement du matériel terrain

Nous constatons que le drone a l'amortissement le plus élevé. Les scanners lasers n'ont cependant un coût d'amortissement que de deux euro inférieur. Par ailleurs, celui des appareils photos est insignifiant. Nous pouvons donc conclure que la méthode drone a un coût d'amortissement matériel plus important (causé par une moins grande utilisation de l'outil).

4.2.4.2 Logiciels

Les logiciels associés aux appareils de mesure ont également un amortissement. Le tableau 4.7 renseigne les différents logiciels utilisés pour chaque méthode.

	Logiciels	Coût	Durée d'utilisation sur 3 ans	Coût horaire
Lasergrammétrie	Cyclone 3DReshaper	120 000 €	4 680 h	26 €/heure
Photogrammétrie terrestre	Photomodeler Scanner 3DReshaper	11 800 €	1 560 h	8 €/heure
Photogrammétrie aérienne	Photomodeler Scanner 3DReshaper Logiciel drone Helipse	15 000 €	1 560 h	9 €/heure

Tableau 4.7 - Coût d'amortissement des logiciels

Les frais des dépenses des logiciels photogrammétriques représentent uniquement 30 % du prix total des dépenses lasergrammétriques. Nous allons donc maintenant étudier l'impact de l'utilisation de données 3D denses sur un projet de confortement.

4.2.5 Coût de la solution de confortement

[Trochon, 2012] et [Fievet, 2011] ont montré que les confortements étudiés par la méthode traditionnelle (clisimètre et boussole) des géologues génèrent un surcoût de l'ordre de 5 % par rapport à la lasergrammétrie et la photogrammétrique terrestre. En effet, ces deux méthodes fournissent des nuages de points 3D permettant d'estimer au mieux, et de manière similaire, le confortement sur une paroi rocheuse (mise en place de manière stratégique et non plus empirique).

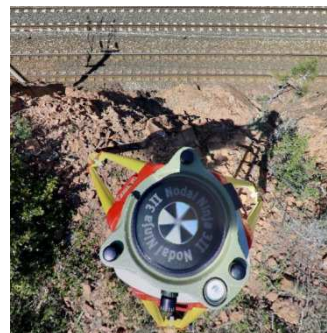
La photogrammétrique aérienne par drone ayant le même ordre de précision que les autres méthodes nous obtenons un coût de confortement identique ce qui nous permet de conclure que les acquisitions par drone sont à la fois pertinentes pour les géomètres et les géologues.

4.2.6 Sécurité des agents et matériels

Durant les différentes étapes du levé, la sécurité des agents peut être mise en jeu si des règles ne sont pas respectées.

Dans le cas de la photogrammétrique terrestre la pose des cibles est risquée car il faut les installer le plus proche possible de la paroi. Un système de sécurité (harnais + corde) doit être mis en place.

La sécurité du matériel génère un coût. En fonction du type de chantier des agents de sécurité sont mobilisés pour assurer la sécurité des agents devant accéder aux voies.



4.2.7 Conclusion

En récapitulant les différentes dépenses dans le tableau 4.8 nous serons plus à même de conclure sur la viabilité de la méthode au sein de l'entreprise.

	Méthode lasergrammétrique	Méthode photogrammétrique terrestre	Méthode photogrammétrique aérienne par drone
Coût acquisition	2 240 €	560 €	560 €
Coût déplacement	3 800 €	3 800 €	3 800 €
Coût traitement	2 600 €	3 040 €	3 040 €
Coût d'amortissement - matériels - logiciels	41 €/h + 10 €/h 26 €/h	10 €/h + 4 €/h 8 €/h	43 €/h + 10 €/h + 2 €/h 9 €/h
TOTAL	9 560 €	7 520 €	7 764 €

Tableau 4.8 - Coût total d'auscultation de paroi rocheuse

À première vue la méthode lasergrammétrique est très onéreuse ; elle est 27 % plus coûteuse que la méthode photogrammétrique terrestre. Le coût des deux méthodes photogrammétriques est similaire. En combinant les deux méthodes, le surcoût sera insignifiant. En effet, la base de calcul sera celle de la photogrammétrique aérienne en ajoutant une heure d'acquisition (280 € supplémentaires) et une journée de plus pour le traitement (400 € en retirant le prix de la calibration). Nous atteignons un budget de **8 404 €**. Cette somme est toujours du même ordre de grandeur que celle de la photogrammétrique terrestre.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en avant la fiabilité et la qualité des données issues du drone. La précision du nuage est équivalente à celle des mesures photogrammétriques terrestres.

Au vu des différentes analyses, nous pouvons conclure sur quel type de chantier l'utilisation du drone est préconisée. Le tableau 4.9 montre, avec l'utilisation d'une focale de 20 mm, quelle méthode utiliser en fonction de la hauteur de la paroi et de sa distance par rapport à la voie.

		Photogrammétrie terrestre	Photogrammétrie aérienne par drone	Photogrammétrie aérienne et terrestre
Distance de la paroi \leq 15 m	Hauteur paroi < 10 m	✓	✗	✗
	Hauteur paroi > 10 m	✗	✗	✓
Distance de la paroi > 15 m	Hauteur paroi < 10 m	✓	✓	✗
	Hauteur paroi > 10 m	✗	✓	✓

Tableau 4.9 - Synthèse d'utilisation de la méthode Drone

✓ : Adapté

✗ : Inadapté

5 Conclusion et perspective

L'objectif de mon travail de fin d'études était d'analyser les processus d'acquisition et de traitement de données acquises par aéronef léger pour les travaux d'inspection de la SNCF sur les ouvrages rocheux. Au vu des conclusions apportées par [Trochon, 2012], les méthodes photogrammétriques « classiques » ne permettaient pas d'obtenir un nuage complet pour des parois de plus de 20 mètres de hauteur et les zones inaccessibles. La solution envisagée pour palier ce problème fut d'étudier l'acquisition des données par drone léger.

La première analyse sur les différents types de drones a permis d'avoir un aperçu de leurs potentiels. En effet, les drones peuvent être de trois types (voilure fixe, voilure tournante ou ballon) et présentent donc des capacités différentes voire complémentaires. Le principal atout de ce matériel est sa capacité à mesurer des zones difficiles d'accès. Concernant l'analyse des parois rocheuses par la SNCF, le choix d'un drone à voilure fixe (type hélicoptère) s'est imposé. En effet, ce type d'appareil permet à la fois de faire du vol stationnaire et du vol linéaire. Cependant, les réglementations qui lui sont appliquées sont très strictes.

Nous n'avons pas eu de drone à disposition durant tout le stage, ce qui ne nous a pas permis de multiplier les chantiers et donc d'améliorer encore la pertinence de notre analyse.

Plusieurs étapes importantes ont été mises en avant afin de réaliser l'acquisition des données :

- L'obtention d'une autorisation de vol via un MAP ou un vol d'expérimentation,
- La délimitation d'un périmètre de sécurité pour protéger les tiers lors de l'acquisition des données
- L'installation de la « station sol » dans un endroit dégagé,
- La procédure de lever, semblable au protocole de lever de photogrammétrie terrestre.

Suite à la phase de levé, la phase de traitement et d'analyse des données nous a permis de mettre en avant la pertinence de ces dernières. En effet, les nuages de points issus du lever par drone ont une précision de 2,5 centimètres, ce qui est tout à fait acceptable pour ce type de chantier et qui démontre donc la pertinence de cette technique de travail.

Cependant la phase d'analyse nous a permis de remarquer que le nuage de points ne recouvrait que partiellement la paroi. En effet, l'altitude de vol du drone ne permet pas de photographier les éléments situés en dessous de surplombs. Cela a pour effet de créer un nuage incomplet, comme pour les méthodes photogrammétriques analysées par [Trochon, 2012] lorsque l'altitude de l'appareil était trop faible. Il semblerait alors pertinent de combiner les données photogrammétriques terrestres ou lasergrammétriques avec celles du drone afin d'obtenir un nuage de points complet, ce qui nous amène à conclure que la solution drone a ses limites.

La méthode « drone » trouve donc sa place pour les chantiers d'auscultation des parois rocheuses. Elle répond aux exigences des géologues qui sont :

- Une précision des données de l'ordre de 5 centimètres,
- Un rendu 3D interprétable par différents corps de métier,
- Des données complètes et à moindre coût.

De plus, la simplicité et la rapidité d'acquisition des données par cette méthode lui offrent un avantage considérable par rapport à la lasergrammétrie. Cependant, le temps de traitement peut

être important en présence de nombreux clichés. La durée nécessaire au calcul ne doit pas être oubliée lors du choix de la méthode à appliquer à un chantier.

Un autre avantage de cette méthode est son coût. En effet, cette nouvelle méthode est 19 % moins onéreuse que la lasergrammétrie et du même ordre de prix que la photogrammétrie terrestre. La combinaison de ces deux méthodes photogrammétriques n'augmentera pas le coût car les données seront acquises rapidement.

De plus cette technique peut être utilisée sur tous les types de parois rocheuses. Elle est toutefois soumise à des contraintes de sécurités et le survol de zones peuplées est strictement interdit. De plus, le télépilote doit toujours avoir le drone en vue directe.

D'un point de vue personnel, ce travail de fin d'études m'a plongé durant 6 mois dans une entreprise effectuant des travaux spécifiques. J'ai ainsi pu découvrir l'application de la topographie au milieu ferroviaire et de ce fait apporter de nouvelles connaissances à ma formation. De plus, j'ai été amenée à travailler avec d'autres corps de métier, comme des géologues, ce qui m'a fait remettre en questions mon point de vue sur les différentes méthodes de lever et m'a permis de comprendre les attentes de chacun.

Bibliographie

Ouvrages, Revues, Cours et Thèses :

- [AFTES, 2003] Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain [2003], Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains, Recommandations de l'AFTES, p. 138-186.
- [Landes, Grussenmeyer, 2011] Landes, Grussenmeyer, Revue XYZ 2011, n°128, p.37 - 49
- [Cours Photogrammétrie L. Chandelier ES1, 2008a] Photogrammétrie Analytique ES1 partie 1, 2008, diapo 5
- [Cours Photogrammétrie E. Simonetto ES2, 2011-2012] E. SIMONETTO, Cours Rappel des formules de photogrammétrie ES2, 2011-2012, diapo 17
- [Cours Photogrammétrie L. Chandelier ES1, 2008b] L. CHANDELIER, Cours Photogrammétrie Analytique ES1 partie 2, 2008, diapo 8
- [Fievet, 2011] A. FIEVET, *Apport de la lasergrammétrie terrestre pour les études de confortements de parois rocheuses*, Mémoire d'Ingénieur INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie, p.61-70
- [Trochon, 2012] M. TROCHON, *Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d'image pour l'étude des ouvrages rocheux*, Mémoire d'Ingénieur INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie, p.67-75
- [C. P. Vavoulidis et I. Pitas, 1999] C. P. Vavoulidis and I. Pitas, *Morphological Iterative Closest Point*, 1999, p.1-2
- [D. Giradeau-Montaut, M. Roux, R. Marc, G. Thibault ; 2005] D. Giradeau-Montaut, M. Roux, R. Marc, G. Thibault ; *Change Detection On Points Cloud Data Acquired With A Ground Laser Scanner*, 2005, p.3
- [Assali, 2012] P. ASSALI, *Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire*, 2012, p.46-61
- [Bornaz et Dequal, 2003a] Bornaz, L. et Dequal, S. (2003a). *A new concept : the solid image*. In XIXth CIPA Symposium - 30 September, 4 October - Antalya, Turkey.
- [Bornaz et Dequal, 2003b] Bornaz, L. et Dequal, S. (2003b). *The Solid Image : a new concept and its applications*. In The International Archives of the Photogrammetry, Remote

Site Internet :

- [@aft, vu juillet 2013a] @Association Française de Topographie, *Lexique*, consultation juillet - août 2013
URL : <http://www.aftopo.org/>
- [@CANON, vu juillet 2013] Site du constructeur d'appareil photo CANON
URL : http://www.canon.fr/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_7D/
URL :
http://www.canon.fr/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_5D_Mark_III/
- [@Leica Geosystem] @Leica Geosystem, notice laser scanner HDS 7000 et C10, vu juillet 2013
URL: <http://hds.leica-geosystems.com/>
- [@Lematin.ch, 2013] Site Le Matin, article "Le drone pigeon de l'US Air Force vous salue bien", vue mars 2013
URL : <http://www.lematin.ch/savoirs/sciences/Le-drone-pigeon-de-l-US-Air-Force-vous-salue-bien/story/18901927>
- [@RTS.ch, vu mars 2013] Site RTS.ch, article "Ces drones qui vont changer nos vies", vu mars 2013
URL : <http://www.rts.ch/video/emissions/mise-au-point/4747083-ces-drones-qui-vont-changer-nos-vies.html>
- [@tom'sGUIDE, vu juillet 2013] Site tom'sGuide, article "Photo plein format : à quoi ça sert, comment ça marche, pourquoi c'est cher ?", vu en juillet 2013
URL : <http://www.tomsguide.fr/article/Photo-plein-format,2-843.html>
- [@Wikipedia, vu juillet 2013] Site Wikipédia, article sur les capteurs DIGIC, vu juillet 2013
URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/DIGIC>
- [@Direct INDUSTRY, vu mars 2013a] Site Direct Industry, le salon online de l'industrie, catalogue des drones à voilure fixes, vu mars 2013
URL : <http://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/drone-voilure-fixe-86134.html>
- [@Delair Tech, vu mars 2013] Site Delair Tech, constructeur de drone, vu mars 2013
URL : <http://www.delair-tech.com/fr>
- [@Bormatec, vu mars 2013] Site Bormatec, constructeur drone voilure fixe, vue mars 2013
URL : <http://bormatec.com/>
- [@Aerovision, vu mars 2013] Site Aerovision, constructeur drone voilure fixe, vue mars 2013
URL : <http://www.aerovision-uav.com/>
- [@Zala aero, vu mars 2013] Site Zala Aero, constructeur drone voilure fixe et tournantes, vue mars 2013
URL : <http://zala.aero/en/UAVs/>
- [@Insitu, vu mars 2013] Site Insitu, constructeur drone voilure fixe, vue mars 2013
URL : <http://www.insitu.com/>

[@Survey Copter, vu mars 2013]	Site Survey Copter, constructeur drone voileure fixe et ballon, vue mars 2013 URL : http://www.survey-copter.com/voilure-fixe/
[@Fly-n-Sense, vu mars 2013]	Site Fly-n-Sense, constructeur drone voileure fixe, vue mars 2013 URL : http://www.fly-n-sense.com/
[@Mavinci, vu mars 2013]	Site Mavinci, constructeur drone voileure fixe, vue mars 2013 URL : http://www.mavinci.de/
[@Cyber Flight, vu mars 2013]	Site Cyber Flight, constructeur drone voileure fixe et tournantes, vue mars 2013 URL : http://www.enhancedpro.com/product-category/air-systems/
[@Direct INDUSTRY, vu mars 2013b]	Site Direct Industry, le salon online de l'industrie, catalogue des drones à voileure tournantes, vu mars 2013 URL : http://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/drone-voilure-tournante-86136.html
[@Infotron, vu mars 2013]	Site Infotron, constructeur drone voileure tournantes, vue mars 2013 URL : http://www.infotron.fr/
[@Vision-du-ciel, vu mars 2013]	Site Vision-du-ciel, constructeur drone voileure tournantes, vue mars 2013 URL : http://vision-du-ciel.com/index.php
[@Schiebel, vu mars 2013]	Site Schiebel, constructeur drone voileure tournantes, vue mars 2013 URL : http://www.schiebel.net/
[@Helipse, vu mars 2013]	Site Helipse, constructeur drone voileure tournantes, vue mars 2013 URL : http://helipse.com/
[@Wikipédia, vu mars 2013a]	Site Wikipédia, article sur les montgolfières, vu mars 2013 URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Montgolfi%C3%A8re
[@Wikipédia, vu mars 2013b]	Site Wikipédia, article sur les dirigeables, vu mars 2013 URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Ballon_dirigeable
[@Wikipédia, vu mars 2013c]	Site Wikipédia, article sur les ballons à gaz, vu mars 2013 URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Ballon_%C3%A0_gaz
[@Direct INDUSTRY, vu mars 2013c]	Site Direct Industry, le salon online de l'industrie, catalogue des drones ballons, vu mars 2013 URL : http://www.directindustry.fr/tab/drone-ballon.html
[@Fosung, vu mars 2013]	Site Fosung, constructeur drone ballon, vue mars 2013 URL : http://www.uconsystem.com/
[@Légifrance, 2012a]	Site Legifrance.gouv.fr, Arrêté relatif à la conception des aéronefs civils URL : http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025834953&dateTexte=&categorieLien=id

- [@Légifrance, 2012b] Site Legifrance.gouv.fr, *Arrêté relatif à l'utilisation de l'espace aérien*
URL :
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025834986>
- [@IGN, vu juillet 2013] Site IGN (Institut Géographique National)
URL : <http://www.ngi.de/FR/FR2-2-4.shtm>

Résumé



ÉTUDE DES PROCESSUS D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DE DONNÉES ACQUISES PAR AÉRONEF LEGER POUR LES TRAVAUX D'INSPECTION DE LA SNCF



Application aux ouvrages rocheux

Mots clés : Drones, photogrammétrie aérienne, parois rocheuses, SNCF, modélisation, géologie, confortements

L'aéromodélisme, qui était jusqu'ici principalement un hobby ou un moyen de démonstration pour des modèles à grande échelle, devient un acteur important des nouvelles méthodes de lever topographique en zones difficiles. L'armée est à la source de ces avancées technologiques et développe des drones à capteurs, initialement à des fins de défense, qui sont ensuite accessibles au grand public. Soucieuse d'assurer la sécurité des biens et des personnes circulant sur le réseau ferré national, la SNCF souhaite étudier la pertinence de l'utilisation de drones pour les opérations de surveillance et de maintenance des infrastructures. Afin d'analyser cette méthode de relevé innovante nous avons réalisé une analyse technico-économique de cette nouvelle technologie dans le cadre d'une étude de confortement de parois rocheuses. Cette étude a été menée en comparant les données issues de levés réalisés à l'aide d'un drone avec des données acquises par des techniques actuelles déjà éprouvées (scanner laser 3D et photogrammétrie terrestre).

1. Contexte et objectifs de l'étude

Le Réseau Ferré National (RFN) comprend plus de 31 000 km de voies ferrées et plus de 100 000 ouvrages (ouvrages en terre et ouvrages d'art). Parmi eux, 8 000 font l'objet d'une surveillance accrue en raison des risques potentiels induits par la qualité et le type de matériaux qui les constituent. Une étude géostructurale est donc menée sur chaque site sensible afin d'éviter d'éventuelles perturbations causées par des chutes de blocs sur la voie ; cette étude aboutie à la mise en place de confortements "géologiques" (grillage plaqué ancré, grillage tendu, ancrages, etc.).

Les levés de parois rocheuses, indispensables à l'analyse de risque d'une paroi rocheuse, sont actuellement réalisés à l'aide de relevés manuel (boussole et clisimètre) et de relevés topographiques classiques ou lasergrammétriques. L'ensemble des données étant collectées "à hauteur d'homme" il nous est impossible de mesurer la partie supérieure des ouvrages et donc de déterminer l'ensemble des caractéristiques géologiques de l'ouvrage étudié.

Dans le but de réduire ce manque, nous allons étudier l'acquisition des données sur les parois rocheuses par la méthode photogrammétrique par drone.

2. Les drones et ses réglementations

Un drone est un objet volant sans pilote à bord. Ses caractéristiques techniques (taille réduite, faible poids, facilité de manœuvre via une « station au sol ») lui permettent de réaliser des acquisitions dans des zones inaccessibles. Différents types d'aéronef coexistent : à voilure fixe (avion, planeur, etc.), à voilure tournante (hélicoptère) ou ballons (voir figure 1).



Figure 1 - De gauche à droite : voilure fixe (Source Delair Tech), voilures tournantes (Source : Delta Drone) et ballon (Source : Foonsung)

Chaque catégorie de drone présente des caractéristiques particulières. Si l'autonomie des engins à voilure fixe est généralement importante, ils ne peuvent cependant pas effectuer de vol stationnaire. En revanche, les hélicoptères peuvent allier vol stationnaire et vol linéaire mais ils présentent néanmoins plusieurs contraintes car ils sont bruyants et leur autonomie est faible. En ce qui concerne les aéronefs de type ballon, ils ont une grande envergure (de 3 à 9 mètres) et possèdent une grande autonomie, mais ils sont limités dans leurs déplacements par les courants d'air chaud.

Malgré l'absence de pilote à bord, le drone est soumis à une réglementation stricte. La France est le premier pays au monde à avoir mis en place une législation pour contrôler les vols de drones. Ainsi, deux articles de loi (*Arrêtés du 11 avril 2012*) régissent l'utilisation de ce type d'aéronefs dans l'espace aérien national (*Source : Légifrance*). Ces arrêtés présentent les différentes catégories de drones et les scénarii de vols autorisés. Cependant la réglementation ne prend pas en compte le modèle de drone mais plutôt sa masse au décollage.

Après analyse de ces arrêtés et des contraintes d'utilisation en milieu ferroviaire, la SNCF a acquis un drone de type hélicoptère Helipse HE 190 (voir figure 2) pour la réalisation des travaux d'auscultation des parois rocheuses. Ce drone d'une masse au décollage inférieure à 25 kg est classé en catégorie E par la législation (*Source : Arrêté du 11 avril 2012, article 4*).

Les scénarii sont les types de vols que peut effectuer le drone. Le drone HE 190 étant de catégorie E n'a le droit de voler que dans les scénarii 1 et 2 qui sont décrits ci-dessous :



	Vue directe	Zone peuplée	Distance maximum du pilote
S-1	Oui	Non	100 m
S-2	Non	Non	1 000 m

Figure 2 - Le drone HE 190 (*Source: Helipse*) et ses différents scénarii de vol

Ce drone étant autorisé à évoluer dans l'espace aérien français par la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile), nous avons pu réaliser l'analyse technico économique d'un relevé d'une paroi rocheuse à l'aide de cet aéronef. Cette étude a été effectuée sur une paroi située à la gare de Le Trayas (dans le Var, à proximité de Saint Raphaël).

3. Modélisation et analyse géostructurale

À l'aide du drone équipé d'un appareil photo reflex Canon EOS 7D couplé à un objectif à focale fixe de 20 mm, nous avons acquis des données sur une zone représentative de l'affleurement rocheux (zone d'environ 20 m par 20 m) avec un plan de vol linéaire qui constitue la meilleure solution pour un gain de temps d'acquisition et de calcul (moins de clichés).

Nous avons alors réalisé différents tests afin d'évaluer la qualité du lever pour une analyse géostructurale. Pour la réalisation d'études géostructurales de paroi rocheuses la précision attendue est de 5 cm.

À partir des clichés acquis, nous avons pu créer un nuage de points 3D par corrélation épipolaire dense via le logiciel *Photomodeler*.

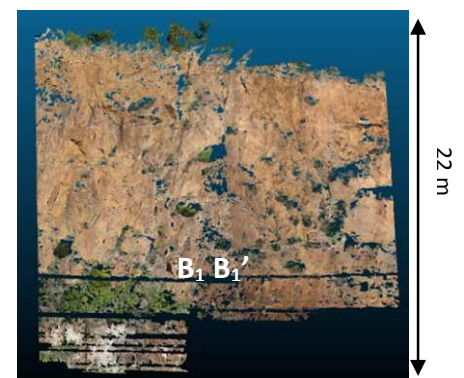
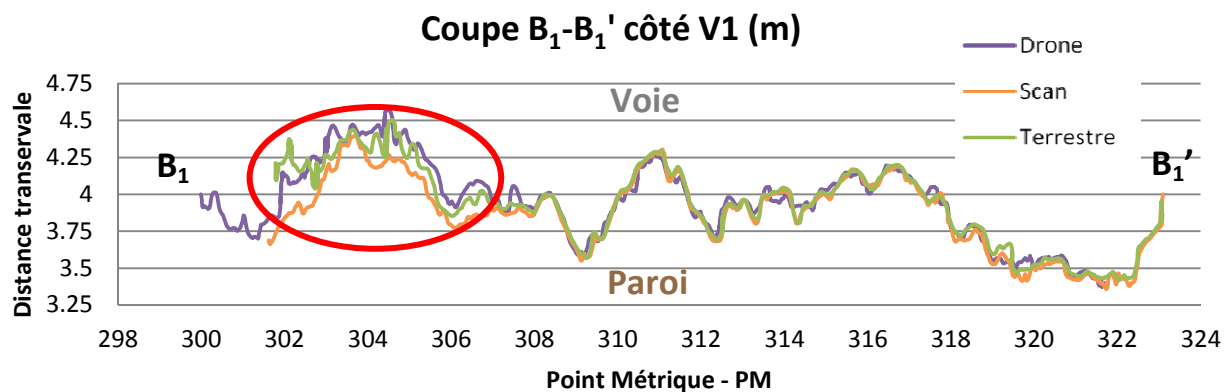


Figure 3 - Nuage de points drone

Une première analyse visuelle du nuage de points obtenu, nous permet de constater la présence de trous dans le modèle obtenu par corrélation d'image (voir figure 3). Ce manque de données est causé d'une part par la présence de végétation sur la paroi qui rend difficile voire

impossible la réalisation d'une corrélation d'image de qualité sous *Photomodeler* (éléments non représentatifs de l'affleurement rocheux, mouvements de la végétation au cours des mesures, ...). Ces manques résultent de l'altitude de vol du drone. En effet, le drone survolant la partie supérieure de la paroi, il nous est impossible de photographier les éléments en dessous des surplombs. Une première solution à ce problème est de combiner plusieurs jeux de données (lasergrammétrie ou photogrammétrie terrestre). Ainsi en concaténant ce type d'acquisition avec les données du drone il sera possible de combler ce manque pour obtenir un modèle 3D complet.

Une fois ces manques identifiés, nous avons étudié leur impact sur la qualité de l'analyse géostructurale. Pour ce faire, des coupes ont été réalisées sur les maillages des nuages de points issus de différentes méthodes de lever (lasergrammétrie, photogrammétrie terrestre et photogrammétrie aérienne par drone). Au regard de sa précision (validée par Fievet 2011) le nuage de points scanner est ici considéré comme étalon (valeur la plus probable de l'observation). L'analyse comparative des profils nous fournit une précision des points levés par drone de 2,3 cm, ce qui respecte la tolérance demandée. En analysant une coupe de la paroi (coupe B_1 - B_1' , matérialisée sur la figure 3), nous obtenons :



Nous constatons ici que quelle que soit la méthode d'acquisition, les courbes ont la même allure. Les écarts les plus importants (cercle rouge) sont situés au niveau de zones de végétation.

Après ce contrôle visuel, des tests permettant de valider la précision topographique du nuage de points ont été menés. Cette analyse effectuée en comparant le nuage drone aux nuages lasergrammétrique et photogrammétrique nous a permis d'estimer la précision du modèle 3D créé à l'aide des clichés « aériens » à moins de 3 cm.

L'impact d'une erreur de géoréférencement sur la qualité du nuage de points final a également été étudié. En effet, le drone mesurant des zones inaccessibles, il nous sera difficile voire impossible de positionner des points de calage dans la majorité des relevés qui seront réalisés dans le futur. Afin d'évaluer l'impact de cette contrainte nous avons comparés un nuage de points drone référencé à l'aide de nombreux points de contrôle et le nuage de points drone simplement mis à l'échelle à l'aide de 2 points. Nous avons alors analysé les nuages obtenus tant en terme de précision que de contenu. Ce test nous permet de conclure que l'obtention d'un nuage de points de qualité nécessite une mise à l'échelle à partir de 4 à 6 points (2 ou 3 distances) convenablement répartis sur le modèle.

Ces différents tests nous ont permis de valider l'utilisation des données drone pour les levés topographiques de parois rocheuses.

Cette analyse nous permet de valider la cohérence topographique des données néanmoins afin d'affiner notre étude nous avons souhaité contrôler la pertinence géologique de ces acquisitions (possibilité d'exploitation par les géologues).

Cette analyse géostructurale a été menée avec le logiciel GAIA GeoROC (logiciel développé par la SNCF). Celui-ci permet de classier géologiquement une paroi en analysant le vecteur normal de chaque point du nuage de points.

La classification de la paroi rocheuse est réalisée via la création d'un canevas de Schmidt. Ce canevas qui permet de déterminer les différentes familles d'orientation de roches est l'outil de base du géologue dans le cadre d'une étude structurale. Que ce soit à partir des données photogrammétriques terrestres ou par drone, 3 orientations apparaissent (cercles verts, figure 4).

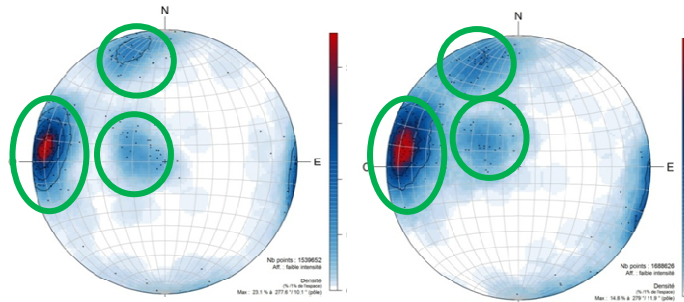


Figure 4 - Canevas de Schmidt : à Gauche les données Terrestre ; à Droite les données Drone

Une fois la caractérisation automatique effectuée, nous pouvons appliquer (via une palette de couleur) les différentes familles sur des photographies afin d'en faciliter l'interprétation par les géologues (figure 5). Cette superposition photo/nuage de points est réalisée via le logiciel GAIA Géoroc. Malgré des teintes différentes appliquées par le logiciel (problème logiciel en cours de correction), les différentes familles d'orientation déterminées à l'aide du drone et des méthodes classiques sont identiques. Nous pouvons donc en déduire que les données mesurées par le drone sont exploitables et pertinentes dans le cadre d'études géologiques.

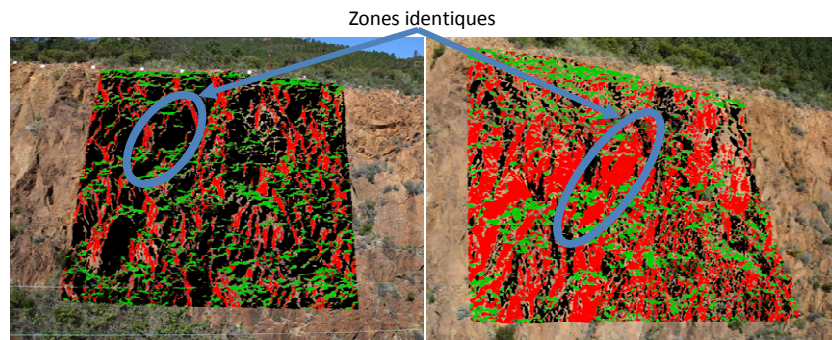


Figure 5 - Création de l'image solide ; gauche à droite : Terrestre et Drone

4. Conclusion et perspective

Cette étude a mis en avant le potentiel du levé par drone pour des analyses de parois rocheuses. Atteignant une précision de 2,5 cm pour une tolérance de 5 cm, ces données sont pertinentes tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

Afin d'obtenir un nuage de points complet d'une paroi rocheuse et ainsi éviter les masques causés par la présence de surplombs sur la paroi par exemple nous pensons qu'il est indispensable de combiner cette méthode avec des données scanner laser ou photogrammétrie terrestre.

La méthode « drone » trouve sa place dans les chantiers d'auscultation des parois rocheuses car cette méthode d'acquisition des données est rapide, simple et peu coûteuse, ce qui lui confère un avantage considérable par rapport à la lasergrammétrie. Toutefois, la durée de traitement est fonction du nombre de photos et peut donc être importante.

L'acquisition des données étant validée pour des vols stationnaires, une nouvelle analyse pourrait être menée pour analyser les données issues des vols linéaires le long des voies SNCF.

Table des illustrations

Illustration 2.1 - Chute de blocs sur les voies ferrées - <i>Source : SNCF</i>	10
Illustration 2.2 - Exemples de parades actives et passives. De gauche à droite : grillage plaqué ancré, écran gabions et un filet détecteur - <i>Source : SNCF</i>	11
Illustration 2.3 - Laser scanner C10 - <i>Source : @Leica Geosystem</i>	11
Illustration 2.4 - Laser scanner HDS 7000 - <i>Source : @Leica Geosystem</i>	12
Illustration 2.5 - Représentation de la formule image - <i>Source : E. SIMONETTO</i>	13
Illustration 2.6 - Couple stéréoscopique - <i>Source : L. CHANDELIER</i>	13
Illustration 2.7 - De gauche à droite : CANON EOS 7D (<i>Source : @Clubic.com</i>) et CANON EOS 5D (<i>Source : @01.net</i>)	13
Illustration 2.8 - Photo Full Frame avec superposition d'un cadre CMOS 22,3 x 14,9 mm - <i>Source : @tom'GUIDE</i>	14
Illustration 2.9 - Hélicoptère à double rotor contrarotatif - <i>Source : @Big Squid RC</i>	16
Illustration 2.10 - Quadrirotor - <i>Source : @Wikipedia</i>	17
Illustration 2.11 - Convertible - <i>Source : @Omnilogie</i>	17
Illustration 2.12 - Drone HE 190.....	19
Illustration 2.13 - Drone HE 190 - Gauche : l'ensemble du drone sans la carène ; Droite : les composants électroniques	19
Illustration 2.14 - Éléments de la « station sol »	20
Illustration 2.15 - Logiciel Drone HE 190	21
Illustration 2.16 - Exemple de déplacement de drone avec une carte.....	22
Illustration 2.17 - Hauteur de vol en fonction des distances et du type d'infrastructure - <i>Source : SNCF</i>	24
Illustration 3.1 - Localisation du chantier	26
Illustration 3.2 - Paroi de Le Trayas V1	27
Illustration 3.3 - Paroi côté V2	27
Illustration 3.4 - Erreur de consolidation	28
Illustration 3.5 - Assemblage des nuages de points	29
Illustration 3.6 - Bras Nodal Ninja 3 - <i>Source : @Nodal Ninja</i>	29
Illustration 3.8 -Extrait du Truview	30
Illustration 3.7 - Assemblage colorisé.....	30
Illustration 3.9 - Représentation du positionnement de cibles	31
Illustration 3.10 - Nuage de points par photogrammétrie terrestre. À gauche : Terrestre + canne ; À droite : Terrestre	32
Illustration 3.11 - Représentation des trois plans de vol.....	33
Illustration 3.12 - Position des couples d'aérotriangulation et stéréoscopique pour les plans de vol 1 et 2....	34
Illustration 3.13 - Position des caméras.....	34
Illustration 3.14 - Recouvrement des clichés	34
Illustration 3.15 - Impression de flou sur les clichés drone	35
Illustration 3.16 - Schématisation du déplacement du drone	35
Illustration 3.17 - Nuages de points issus du drone : à gauche paroi V1 ; à droite paroi V2	36

Illustration 4.2 - Aperçu de l'erreur vue du dessus	38
Illustration 4.1 - Impact d'une erreur radiométrique sur le nuage	38
Illustration 4.3 - Nuage de points colorisé en fonction des écarts.....	39
Illustration 4.4 - Position des erreurs	39
Illustration 4.5 - Histogramme de la précision des points	39
Illustration 4.6 - Gauche maillage comportant des erreurs ; Droite maillage à pas progressif	40
Illustration 4.7 - Maillage de végétation pour les données scanner	41
Illustration 4.8 - Superposition des maillages avec retrait des zones de végétations.....	41
Illustration 4.9 - Vue du dessous de la paroi V2, aperçu d'un nuage parsemé	42
Illustration 4.10 - Position des coupes ; Droite paroi V2 ; Gauche paroi V1	42
Illustration 4.11 - Photo aérienne pour la mise en situation des coordonnées ferréolocalisées - <i>Source : Google Map</i>	43
Graphique 4.1 - Coupe A ₁ -A ₁ ' côté V1.....	43
Illustration 4.12 - Excédant de maillage.....	44
Graphique 4.2 - Coupe B ₁ -B ₁ ' côté V1	44
Illustration 4.13 - Perturbation des nuages par la végétation	44
Graphique 4.3 - Coupe C ₁ -C ₁ ' côté V1	45
Graphique 4.4 - Coupe D ₁ -D ₁ ' côté V1.....	45
Graphique 4.6 - Coupe B ₁ -B ₁ ' côté V2	46
Graphique 4.5 - Coupe A ₁ -A ₁ ' côté V2.....	46
Illustration 4.14 - localisation des erreurs	46
Illustration 4.15 - Manque de corrélation sur la zone des caténares - extrapolation d'un maillage plat	47
Graphique 4.7 - Coupe C ₁ -C ₁ ' côté V2	47
Illustration 4.16 - Positionnement des écarts sur la paroi V2.....	47
Graphique 4.8 - Coupe D ₁ -D ₁ ' côté V2.....	48
Illustration 4.17 - Logiciel GAIA GeoROC	49
Illustration 4.18 - Image solide : 3 matrices de couleur et 1 matrice de distance - <i>Source : P. ASSALI</i>	49
Illustration 4.19 - Canevas de Schmidt ; à Gauche les données Terrestre ; à Droite les données Drone	50
Illustration 4.20 - Colorisation des points par orientation ; de gauche à droite : Terrestre et Drone	50
Illustration 4.21 - Création de l'image solide ; gauche à droite : Terrestre et Drone	51
Illustration A7.1 - Position des cibles par rapport à la station.....	85
Illustration A8.1 - Cube éclaté	86
Illustration A8.2 - Fenêtre de sélection des points homologues	87
Illustration A8.3 - Nuage de points scanner colorisé.....	87
Illustration A9.1 - Protocole de prise de photos - <i>Source : Trochon</i>	88
Illustration A9.2 - Positions des points homologues entre clichés	89
Illustration A10.1 - Mur d'étalonnage SNCF.....	90
Illustration A11.1 - Variation de <i>Texture type</i> vue de face - Droite à gauche : T=3, T=2, T=1.....	91
Illustration A11.2 - Variation de <i>Texture type</i> vue de côté - Droite à gauche : T=3, T=2, T=1	92

Liste des tableaux

Tableau 2.1 - Comparaison des caractéristiques techniques des lasers scanners - <i>Source : @Leica Geosystem</i>	12
Tableau 2.2 - Caractéristiques techniques des appareils photos reflex - <i>Source : @CANON</i>	13
Tableau 2.3 - Liste (non exhaustive) des modèles à voilures fixes par constructeur	16
Tableau 2.4 - Liste des modèles à voilure tournante par constructeur	17
Tableau 2.5 - Liste des modèles de type ballon	18
Tableau 2.6 - Comparaison des modèles	18
Tableau 4.1 - Précision à un sigma (67,5% des valeurs) des nuages de points	39
Tableau 4.2 - Signification des couleurs pour les deux jeux de données	51
Tableau 4.3 - Coût d'acquisition des données.....	52
Tableau 4.4 - Coût de déplacement	53
Tableau 4.5 - Coût de traitement des données	53
Tableau 4.6 - Coût d'amortissement du matériel terrain.....	54
Tableau 4.7 - Coût d'amortissement des logiciels.....	54
Tableau 4.8 - Coût total d'auscultation de paroi rocheuse	55
Tableau 4.9 - Synthèse d'utilisation de la méthode Drone	56
Tableau A5.1 - Caractéristique des <i>scénarii</i>	73
Tableau A5.2 - Aéronefs volant dans les <i>scénarii</i>	74
Tableau A5.3 - Catégories ayant obligation ou non d'un document de navigabilité	74
Tableau A5.4 - Conditions pour obtenir une autorisation de vol	75

Table des annexes

Annexe 1 : Résumé article du 11 avril 2012 - relatif à la conception des aéronefs civils	71
Annexe 2 : Autorisation particulière de vol du 22 au 25 avril 2013	79
Annexe 3 : Autorisation particulière de vol du 28 au 31 mai 2013	82
Annexe 4 : Protocole levé scanner laser 3D	85
Annexe 5 : Traitement du nuage scanner	86
Annexe 6 : Levé photogrammétrie terrestre	88
Annexe 7 : Étalonnage des appareils	90
Annexe 8 : Création du nuage sous <i>Photodeler Scanner</i>	91

Annexe 1 : Résumé article du 11 avril 2012 - relatif à la conception des aéronefs civils

TEXTES GÉNÉRAUX

Art. 1^{er} - Objet

Cet arrêté **fixe les dispositions** qui s'appliquent **aux aéronefs civils** qui **circulent sans aucune personne à bord** dans le cadre des activités d'aéromodélisme, des activités particulières, ou des vols expérimentaux.

Il ne s'applique pas :

- aux ballons libres, notamment les ballons utilisés pour les relevés et études de l'atmosphère
- aux fusées
- aux cerfs-volants

Art. 2 - Définitions liées aux aéronefs qui circulent sans personne à bord

1. **Aéronef télépiloté** : aéronef qui circule sans personne à bord.
2. **Système d'aéronef télépiloté** : aéronef télépiloté + système de commande et de contrôle depuis le sol.
3. **Télépilote** : personne qui manœuvre l'aéronef.
4. **Captif** : il est dit « captif » s'il est relié au sol, à un mobile ne pouvant être soulevé ou déplacé par l'aéronef ou par son télépilote.
5. **Automatique** : il évolue de manière « automatique » si son vol a été programmé par quelque moyen que ce soit.
6. **Vue directe** :
 - a. Il circule « **en vue** » d'après l'arrêté du 11 avril 2012.
 - b. Le vol s'effectue dans le champ visuel du télépilote.
 - c. La vision de l'aéronef par le télépilote s'effectue en vue directe sans aucun moniteur.

Art. 3 - Nature des activités particulières concernées

1. Elles sont les suivantes :
 - a. Les relevés, photographies, observations et surveillances aériennes, qui comprennent la participation aux activités de lutte contre l'incendie.
 - b. Toute autre activité nécessitant une dérogation aux règles de l'air.
2. **Exploitant d'un aéronef** : personne morale ou physique responsable de l'organisation ou de la pratique de l'activité particulière avec cet aéronef.

Art. 4 - Classification des aéronefs télépilotés

1. Catégorie C : **Les aéronefs télépilotés captifs** qui ne sont pas des aéromodèles.
2. Catégorie D : Les aéronefs télépilotés **qui ne sont pas** des aéromodèles, motorisés ou non, non captifs, de masse maximale au décollage < 2 kg, ou, pour **les aéronefs à gaz inerte**, de masse totale (masse structurale et charge emportée) < 2 kg.
3. Catégorie E : Les aéronefs télépilotés **qui ne sont pas** des aéromodèles, qui ne sont pas de catégorie C ou D, motorisés ou non, de masse maximale au décollage < 25 kilogrammes ou pour les aéronefs télépilotés **à gaz inerte** de masse totale < 25 kg.

4. Catégorie F: Les aéronefs télépilotés **qui ne sont pas** des aéromodèles, de masse maximale au décollage < 150 kg **ne respectant pas** les caractéristiques de la catégorie C ou D ou E.
5. Catégorie G: Les aéronefs télépilotés **qui ne sont pas** des aéromodèles et **ne correspondant pas** aux critères des *catégories C à F*.

Art. 6 - Limitation d'opération pour le télépilote

1. Le télépilote **ne peut pas piloter** son drone s'il est à bord d'un **véhicule en mouvement**.
2. Le ministère chargé de l'aviation civile peut **émettre une autorisation** avec des limitations, sur *demande et justifications acceptables*.

Art. 7 - Vol hors vue d'un aéronef télépilote de catégorie G

Un aéronef de catégorie G **ne peut pas circuler hors vue directe de son télépilote**, sauf s'il est certifié avec son système de commande et contrôle.

Art. 9 - Exigences applicables aux activités particulières avec des aéronefs télépilotes

Sans préjudice des dispositions liées à l'usage de l'espace aérien, **l'annexe II** définit *les exigences applicables aux aéronefs télépilotes* utilisés lors d'activités particulières et aux personnes qui les mettent en œuvre.

Art. 10 - Exigences applicables aux vols expérimentaux

Sans préjudice des dispositions liées à l'usage de l'espace aérien, **l'annexe III** définit les conditions d'application d'un aéronef pour expérimenter un prototype ou une technologie.

Art. 11 - Contrôles

Des contrôles (vérifications et surveillance nécessaires) peuvent être effectués par des personnes ou organismes habilités à cet effet sous la directive du ministre chargé de l'aviation civile.

Art. 12 - Interdiction d'opérations ne garantissant pas un niveau de sécurité suffisant

Le ministre peut **interdire ou limiter l'utilisation** d'un aéronef télépilote, d'un type d'aéronef ou l'activité d'un exploitant *pour la sécurité des tiers*.

L'activité ne peut reprendre que **si des actions correctives sont mises en place**.

Art. 14 - Le directeur général de l'aviation est chargé de l'exécution du présent arrêté.

Administration compétente :

Deux autorités compétentes :

- Le **ministère chargé de l'aviation civile**
- **L'Agence européenne de la sécurité aérienne** → pour certains aéronefs de la **Catégorie G**.

ANNEXE II

ACTIVITÉ PARTICULIÈRES AVEC DES AÉRONEFS TÉLÉPILOTÉS

1. Les scénarios, les catégories et les conditions :

1.1 Les scénarios :

Différents scénarios ont été créés pour le vol d'aéronef.

	Vue directe	Zone peuplée	Distance maximum du pilote
S-1	Oui	Non	100 m
S-2	Non	Non	1 000 m
S-3	Oui	Oui	100 m
S-4	Non	Non	Pas de contrainte

Tableau A5.1 - Caractéristique des scénarii

Dans le cas d'un **scénario S-4** il faut une **autorisation particulière pour un aéronef précis**. Pour l'obtenir l'exploitant doit faire une **analyse de l'adéquation** de la mise en œuvre de ce scénario. Elle comprend plusieurs volets (**risques pour les tiers, vols expérimentaux, mesures de sécurité et responsabilité de chacun**). Tous ces éléments sont répertoriés dans un **dossier cosigné** qui est **soumis au ministère**.

Scénario S-4 et S-2 :

Un **délai de prévenance de 24h avant le vol** doit être respecté. Le ministère doit être informé par mail (dsac-operation-rpa-bf@aviation-civil.gouv.fr) avec le formulaire suivant :

- **le titre du courrier :** « date du vol (AAAA-MM-JJ) / code postal de la commune du lieu de décollage / nom de l'exploitant ».
- → **Le corps du courrier :**
 - lieu dit du vol et coordonnées géographiques (si disponibles)
 - nom du télépilote et numéro de téléphone
 - hauteur de vol maximale
 - modèle de l'aéronef et caractéristiques principales
- Lors de l'envoi, **l'exploitant demande une notification de distribution de son message**.

Dans le cas d'une **opération durant plusieurs jours**, il faut mettre dans le titre du mail la **date du premier jour** de chantier et dans le **corps du texte préciser la date de fin** du chantier.

« **Hors vue** », la **surveillance** de l'aéronef se fait par le **système de commande et de contrôle** qui permet de connaître le **positionnement de l'aéronef**.

Si l'aéronef survole les périmètres de sécurité ou sort de l'espace de vol planifié, le télépilote doit prendre les **actions nécessaires** pour rétablir la sécurité du vol ou **interrompre le vol** avec un atterrissage d'urgence.

Dans le **scénario S-4**, l'évolution se fait à l'aide d'un dispositif de vision orienté vers l'avant pour la sécurité des tiers et des biens.

Scénario S-1 :

Il peut y avoir une **phase ponctuelle de hors vue** si **l'obstacle a été identifié avant le vol**. Cette phase de hors vue est autorisée si elle est sans danger, et si le télépilote a une **vision globale**

de l'environnement afin de pouvoir anticiper la position du drone. Des tests préalables doivent également avoir été réalisés. Le manuel d'activités définit les conditions dans lesquelles ces plans de vol sont tolérés ou non.

Scénario S-2 :

Il faut limiter le risque d'intrusion des personnes dans la zone d'opération et définir le périmètre maximum du vol. En fonction de la hauteur, du type d'aéronef et de sa vitesse il faut également définir des zones de sécurité dans lesquelles le vol doit être interrompu lorsque le drone y pénètre.

1.2 Les catégories :

Certains aéronefs de la catégorie G naviguent sous la responsabilité de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne, cependant, en attendant la mise en œuvre de dispositions européennes spécifiques, les conditions d'opération sont traitées au cas par cas par le ministère, comme pour toutes les autres catégories.

Les types de scénarii envisageables dépendent de la catégorie de l'aéronef à disposition.

	S-1	S-2	S-3	S-4
Catégorie C	✓		- Masse décollage < 4kg - Masse totale < 25 kg	
Catégorie D	✓	✓	✓	✓
Catégorie E	✓	✓	- Masse décollage < 4kg	

Tableau A5.2 - Aéronefs volant dans les scénarii

Pour les aéronefs de catégorie C, il faut s'assurer que le moyen de retenue du drone est en bon état et adapté aux conditions d'emploi de la mission.

2. Les documents nécessaires et leur obtention :

2.1 Document de navigabilité :

Certaines catégories d'aéronefs doivent avoir un document de navigabilité pour effectuer un vol. Dans le tableau ci-dessous sont résumées les catégories ayant cette obligation :

Catégories	Document de navigabilité	
	Oui	Non
C - Gaz inerte Masse décollage ou totale ≤ 25 kg		✓
C - Gaz inerte Masse décollage ou totale > 25 kg	✓	
D et E		✓
F	✓	

Tableau A5.3 - Catégories ayant obligation ou non d'un document de navigabilité

Les catégories C (à gaz inerte de masse ≤ 25 kg), D et E peuvent faire l'objet d'une autorisation particulière et d'une vérification de l'aptitude de vol pour la catégorie C.

Des démonstrations peuvent être effectuées soit individuellement soit dans le cadre d'une attestation de conception type.

2.2 Autorisations particulières :

Ces autorisations sont délivrées par le ministère pour certains *scénarii* de vol sous plusieurs conditions :

Scénario S-2 et S-3	Scénario S-4
<ul style="list-style-type: none"> - Définition de la configuration de l'aéronef <ul style="list-style-type: none"> - Essais et analyse pour la conformité - Attestation par le postulant de la conformité <ul style="list-style-type: none"> - Démonstration - Dispositif de protection des tiers limitant l'impact à 69 Joules 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir un dossier technique - Attestation par le postulant de la conformité <ul style="list-style-type: none"> - Démonstration

Tableau A5.4 - Conditions pour obtenir une autorisation de vol

Toute **modification** d'un aéronef détenant un document de navigabilité ayant pour effet de le rendre non conforme à l'un des éléments du dossier technique doit être présentée au ministère pour restaurer sa validité.

2.3 Dossier d'utilisation :

Un dossier d'utilisation est requis pour tous les aéronefs **hormis les aérostats de Catégorie C.**

2.4 Condition de navigabilité :

Un aéronef peut effectuer un vol s'il répond à deux critères :

- Administratif
- Technique

2.4.1 Administratif:

Chaque année civile, une déclaration au ministère doit être faite par l'exploitant pour continuer son activité. Il renseigne le **nombre d'heures de vol réalisées par activité** et joint une **synthèse des incidents rencontrés**. Les incidents doivent être notés pour **établir un suivi** qui permettrait **d'améliorer la sécurité des opérations**.

Lors de la **préparation d'une opération**, il faut utiliser des cartes aéronautiques et de l'information aéronautique pour **connaître les règles applicables sur l'espace aérien**.

2.4.2 Technique :

L'aéronef **ne doit par subir de modification** qui le rendrait **non conforme au document de navigabilité**. Il doit être **maintenu apte au vol** et **aucun problème de service** ne doit remettre en cause sa navigabilité.

Son **système de commande et de contrôle** doit être conforme à sa définition initiale.

Les équipements et matériels liés à l'opération sont fixés de manière sûre et ne doivent pas compromettre la **résistance de la structure**, la **qualité de vol**, le **dispositif de commande et de contrôle** de l'aéronef.

Pour les **aérostats**, seul l'usage des **gaz inerte** est **autorisé**.

Le **vol de nuit** n'est **autorisé** qu'avec des **aérostats captifs qui sont rendus visible**.

Un **périmètre de sécurité** doit être appliqué pour la **protection des tiers** :

- Pour **l'atterrissage et le décollage**.
- **Maintien d'un volume de dégagement** pour éviter un obstacle.
- **Respect d'une distance de sécurité de 30m** vis-à-vis des personnes sauf télépilote.
- **Réduction** de la distance si :
 - Les personnes sont en **lien avec l'activité**.
 - Une **procédure et une information** est faite pour la sécurité des personnes.
 - Les personnes fournissent une **attestation signée**.

Pour le **vol en mode automatique**, l'utilisation d'aéronef captif de **catégorie C** doit avoir fait l'objet **d'une approbation du ministère** qui renseigne l'exploitant sur **les conditions aéronautiques** et la **conformité de l'aéronef**.

L'aéronef ne doit **pas dépasser la hauteur de vol maximale de la réglementation**.

2.5 Manuel d'activités particulières et déclaration de conformité : (M.A.P)

Toutes les activités particulières doivent faire l'objet d'un **manuel**, tenu à jour, où sont mentionnées les différentes exigences de l'activité.

Il contient :

- Les conditions de sécurité.
- La procédure d'exécution des activités particulières pour chaque type d'aéronef.
- Le rappel des règles de l'air.
- La responsabilité des télépilotes et leur niveau de formation.
- Les conditions pour un vol de nuit.

Une déclaration de conformité est envoyée au ministère indiquant que l'exploitant répond aux exigences de la réglementation et que les mesures nécessaires pour protéger les tiers et les biens sont mises en place.

Pour obtenir **l'attestation de dépôt**, le **manuel d'activités** ainsi que **ses amendements** sont déposés au ministre avec la **déclaration de conformité**. Le **commencement de l'activité** ne peut se faire qu'après réception de l'attestation.

Un archivage du manuel est fait pour servir de support en cas d'événements graves.

Pour **une évolution de la réglementation** qui modifierait le manuel ou une modification de l'activité, un **amendement** doit être fait dans un **délai de 1 mois**.

L'exploitant doit s'assurer que le **manuel est connu et mis en application**, et que le **manuel de maintenance et de vol** est respecté. Il doit également vérifier le **niveau de compétence théorique et pratique** des télépilotes.

Il informe le ministère pour toute **poursuite ou cessation d'activité**. Il peut **interrompre son activité**, si **l'interruption est supérieure à 12 mois** il doit en informer le ministère et il peut être nécessaire de refaire la procédure.

3. Le télépilote :

3.1 Niveau théorique et pratique :

Le télépilote d'aéronef doit avoir un **certificat d'aptitude théorique** adapté aux types d'activités qu'il exerce.

Ce télépilote reçoit une **déclaration de niveau de compétence (DNC)** par l'exploitant, suite à une **formation**, conformément au **manuel d'activités particulières**.

Selon le scénario le nombre d'heures de pratique et le type de certificat varient :

- **S-4** : licence de **pilote d'avion ou d'hélicoptère obligatoire** et justification d'une expérience de **100h de vol** en tant que commandant de bord.
- **S-4** : dans les 6 mois le télépilote doit avoir acquis une expérience de **20h** dans des conditions de vol de vue avec l'aéronef.
- **S-1, S-2 et S-3** : une aptitude théorique (brevet pilote d'avion, d'hélicoptère, de planeur ou d'ULM) est nécessaire.

La **vérification du niveau de pratique** des télépilotes pour les **aéronefs de plus de 25 kg** est réalisée au ministère à l'aide d'une **démonstration** pour obtenir l'**attestation**.

3.2 Responsabilité :

Le télépilote assure la sécurité des tiers et des biens.

4. Exigences générales :

4.1 Aéronefs :

Certains équipements sont obligatoires sur les aéronefs ou dans certains scénarios.

- **Capteur barométrique** (sauf aéronefs **catégorie G** et aérostats **catégorie C**)
- **Système Fail-crash** (sauf aéronefs **catégorie G** et aérostats **catégorie C**)
- **Système de commande et de contrôle permettant de positionner l'aéronef** : scénario **S-2** et **S4**
- **Vision orientée vers l'avant** : scénario **S-4**
- **Enregistrement des paramètres du vol** : scénario **S-4** et **S-2**
- **Protection des tiers limitant l'impact à 69 Joules** : scénario **S-3** sauf ceux de masse inférieure à 2 kg

L'aéronef doit être **visible** de jour comme de nuit à l'aide d'un **système de balisage** pour la sécurité des tiers et des biens.

De plus une marque d'identification doit se trouver sur le document de navigabilité et sur l'aéronef si la masse au décollage est supérieure à 25 kg. Cette marque peut être **obtenue avant l'achat** et être directement **apposée par le constructeur**. Une **plaque de 10*5 cm** est mise en place sur l'aéronef sur laquelle est mentionné : « Cet aéronef est exploité par : ».

4.2 Administratif :

L'aéronef peut **survoler le territoire français** si l'exploitant est **domicilié en France**. Pour d'autres États il faut une **autorisation spécifique**.

L'exploitant doit **déclarer au ministère tout événement** qui aurait **pu mettre la sécurité des tiers en jeu**. Il doit également **informer le titulaire de l'attestation de conception** de tous les **problèmes rencontrés**.

Pour le **scénario S-4**, il faut présenter au ministère **les données enregistrées lors d'un vol** ainsi que l'**analyse** des données réalisée par le titulaire de l'attestation.

Toutes les attestations (dépôt du manuel d'activités particulières, DNC, certificat de navigabilité de l'aéronef, attestation de démonstration des compétences du télépilote d'aéronef de masse > 25kg) **sont fournies sans délai lors de toute demande d'une autorité**.

ANNEXE III

PROTOTYPES ET VOLS EXPÉRIMENTAUX

Cette annexe concerne tous **les vols de prototypes et les vols expérimentaux** ainsi que leurs **démarches administratives**.

Cela comprend notamment :

- Les vols des **aéronefs prototypes** ou permettant **de développer une technologie**.
- Les vols **expérimentaux**, même avec un aéronef dont la navigabilité a été validée, si l'aéronef **dépasse les conditions d'emplois prévues**.

Leur vol n'est possible qu'après l'obtention **d'une autorisation particulière et temporaire** qui prend la forme d'un **laissez-passer** délivré par le ministère.

Le postulant doit répondre à **différents critères** pour l'obtention de ce laissez-passer :

- La **navigabilité de l'aéronef**, incluant la pertinence de la programmation de la trajectoire du drone ou son mode de contrôle de secours.
- La **capacité du télépilote**, incluant sa capacité à reprendre le contrôle du drone en cas de problème lors d'un vol automatique.
- **Les procédures mises en place** par l'opérateur

Il fournit un **dossier technique des expérimentations** précisant les conditions de vols, les précautions prises pour assurer la protection des tiers. Il doit également présenter les restrictions d'espace aérien spécifiques mises en place pour assurer la sécurité des autres usagers de l'espace aérien.

Cet aéronef ne peut voler qu'au-dessus du territoire de la République Française.

Annexe 2 : Autorisation particulière de vol du 22 au 25 avril 2013



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

Direction générale de l'aviation civile

Direction de la sécurité de l'Aviation civile

Direction navigabilité et opérations

Pôle certification, suivi de navigabilité et aviation générale

Paris, le 17 AVR. 2013

SNCF

M. Grégoire Goussu

6 Avenue François Mitterrand

93574 LA PLAINE SAINT DENIS CEDEX

FRANCE

Référence : DSAC/NO/NAV

Vos réf. :

13 - 193

Affaire suivie par : Arnaud Grut

arnaud.grut@aviation-civile.gouv.fr

Tél. 01 58 09 45 68 – Fax : 01 58 09 43 47

Objet : Autorisation spécifique pour prises de vues aériennes

Monsieur,

Le 4 avril 2013, vous avez demandé à la DSAC une autorisation pour la réalisation de prises de vues aériennes avec des aéronefs télépilotes non-conformes à certaines exigences d'emport d'équipements de l'annexe II de l'arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs circulant sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent.

Après examen des éléments que vous nous avez transmis et en application du paragraphe 1.1 de l'arrêté précité, la DSAC vous délivre l'**autorisation spécifique** suivante :

- Activité particulière : Prises de vues aériennes ;
- Lieu de l'activité : Voie ferrée entre St Raphael et Mandelieu, selon plans en annexe de la présente autorisation ;
- Catégorie d'aéronefs télépilotes : E, masse maximale au décollage de 15 kg / 21 kg;
- Type d'aéronef : Hélicoptères HELIPSE HE-190-TH et HE-190-EL, selon descriptif dans dossiers techniques SNCF ref. He190-TH révision 0 du 03/04/2013 et ref. He190-EL révision 0 du 03/04/2013 ;
- Télépilote : Grégoire Baudime ;
- Conditions applicables : Paragraphes 2.5, 2.6, 2.8, 2.10, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9, 3.10, 3.11, 3.14, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1,

5.3, 5.4 et 5.5 de l'annexe II de l'arrêté précité +
limite d'altitude spécifique ;

- Limitations :

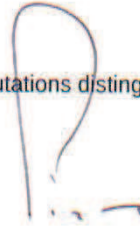
- Vols de jour, hors zone peuplée, en vue directe du télépilote, à une distance horizontale maximale de 100 m de celui-ci ;
- Hauteur de survol maximale : 100 m
- Survol interdit de toute personne ;
- Distance horizontale minimale de 30 m avec les personnes sans lien direct avec l'activité et avec les limites des habitations ou terrains associés;
- Les personnes en lien direct avec l'activité pouvant se trouver à moins de 30 m de l'aéronef doivent être informées des procédures à respecter en cas d'incident et avoir signé une attestation stipulant qu'elles ont été informées ;
- Application des procédures du MAP SNCF déposé auprès de la DSAC Nord ;

- Dates de validité :

22 avril 2013 au 25 avril 2013 inclus.

- La présente autorisation ne dispense pas de l'obtention des autorisations et de l'établissement des protocoles nécessaires au titre des dispositions de l'article 4 de l'arrêté du 11 avril 2012 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord.

Je vous prie de croire, Monsieur, à l'expression de mes salutations distinguées.



Annexe 3 : Autorisation particulière de vol du 28 au 31 mai 2013



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE

Direction générale de l'aviation civile

Direction de la sécurité de l'Aviation civile

Direction navigabilité et opérations

Pôle certification, suivi de navigabilité et aviation générale

Paris, le **28 MAI 2013**

SNCF

M. Grégoire Goussu

6 Avenue François Mitterrand

93574 LA PLAINE SAINT DENIS CEDEX

FRANCE

Référence : DSAC/NO/NAV

Vos réf. :

13 - 0284

Affaire suivie par : Bertrand Ridel

Bertrand.ridel@aviation-civile.gouv.fr

Tél. 01 58 09 49 14 – Fax : 01 58 09 43 47

Objet : Autorisation spécifique pour prises de vues aériennes

Monsieur,

Le 24 mai 2013, vous avez demandé à la DSAC une autorisation pour la réalisation de prises de vues aériennes avec des aéronefs télépilotés non-conformes à certaines exigences d'emport d'équipements de l'annexe II de l'arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs circulant sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent.

Après examen des éléments que vous nous avez transmis et en application du paragraphe 1.1 de l'arrêté précité, la DSAC vous délivre l'**autorisation spécifique** suivante :

- Activité particulière : Prises de vues aériennes ;
- Lieu de l'activité : Voie ferrée entre St Raphael et Mandelieu, selon plans en annexe de la présente autorisation ;
- Catégorie d'aéronefs télépilotés : E, masse maximale au décollage de 15 kg / 21 kg;
- Type d'aéronef : Hélicoptères HELIPSE HE-190-TH et HE-190-EL, selon descriptif dans dossiers techniques SNCF ref. He190-TH révision 0 du 03/04/2013 et ref. He190-EL révision 0 du 03/04/2013 ;
- Télépilote : Grégoire Baudime ;
- Conditions applicables : Paragraphes 2.5, 2.6, 2.8, 2.10, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9, 3.10, 3.11, 3.14, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1,

Copie à : DSAC/SE – P. Rapp / DSAC/NO/OH, N. Tecles

Annexe : plans de la zone de prises de vues

5.3, 5.4 et 5.5 de l'annexe II de l'arrêté précité +
limite d'altitude spécifique ;

- Limitations :
 - Vols de jour, hors zone peuplée, en vue directe du télépilote, à une distance horizontale maximale de 100 m de celui-ci ;
 - Hauteur de survol maximale : 100 m
 - Survol interdit de toute personne ;
 - Distance horizontale minimale de 30 m avec les personnes sans lien direct avec l'activité et avec les limites des habitations ou terrains associés;
 - Les personnes en lien direct avec l'activité pouvant se trouver à moins de 30 m de l'aéronef doivent être informées des procédures à respecter en cas d'incident et avoir signé une attestation stipulant qu'elles ont été informées ;
 - Application des procédures du MAP SNCF déposé auprès de la DSAC Nord ;
- Dates de validité :
 - 28 mai 2013 au 31 mai 2013 inclus
 - 10 juin 2013 au 14 juin 2013 inclus.
- La présente autorisation ne dispense pas de l'obtention des autorisations et de l'établissement des protocoles nécessaires au titre des dispositions de l'article 4 de l'arrêté du 11 avril 2012 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord.

Je vous prie de croire, Monsieur, à l'expression de mes salutations distinguées.


Benoit PINON
Chef du pôle certification,
Suivi de navigabilité et aviation générale

Annexe 4 : Protocole levé scanner laser 3D

Dans cette annexe nous allons expliquer les différents paramètres de levé qui doivent être définis. Comme énoncé dans le corps du rapport au paragraphe 3.4.1.1, 3 cibles minimum doivent être communes entre 2 nuages. Ensuite nous devons paramétrer les données ci-dessous qui définissent la qualité du nuage :

➤ Champ de vision :

Ce paramètre permet de définir une zone plus restrictive de levé. Cela permet de ne pas lever à 360° si ce n'est pas nécessaire. Nous devons définir les coins haut gauche et bas droit soit en rentrant les valeurs numériques soit en les sélectionnant sur l'écran.

➤ La résolution spatiale :

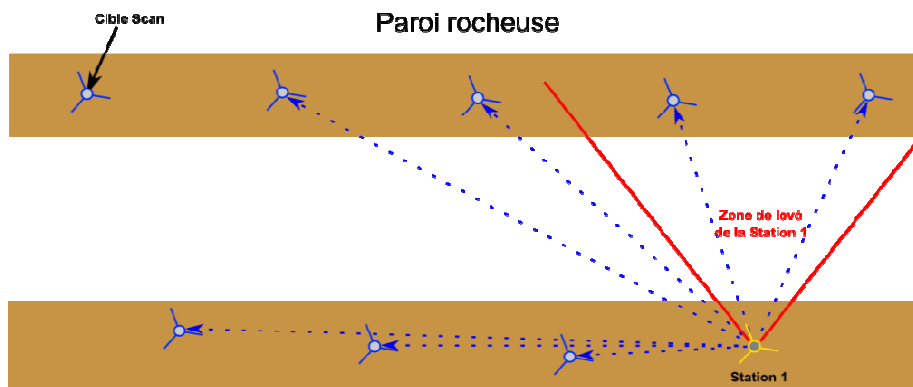
C'est le pas (distance) entre deux points mesurés pour une distance donnée (3 mm à 10 m). Il peut être défini en entrant une valeur métrique ou angulaire.

Il faut définir le pas sur l'objet le plus éloigné que nous devons mesurer. En effet, si l'on définit un pas de 1 mm à 20 m au-delà de cette distance le pas sera de plus en plus grand et en deçà plus petit.

➤ Paramètre des images :

Cette option permet de régler le temps d'exposition pour la prise de la photo. Il peut être soit manuel soit automatique. Ce paramètre influencera la qualité des photos prises par le Leica C10 pour la colorisation du nuage de points.

Pour obtenir une précision de l'ordre de 5 cm le levé devra être réalisé en centrage forcé pour avoir une bonne qualité sur le positionnement de la polygonale, ainsi chaque trépied sera équipé d'une cible scan. Une fois les paramètres ci-dessus réglés, l'acquisition du nuage peut être lancée. Pour que l'assemblage puisse être réalisé, un ensemble de cibles est positionné et chacune est identifiée afin d'apparaître clairement dans les différents nuages.



Comme nous pouvons le voir sur l'illustration ci-dessus, depuis chaque station, au moins 3 cibles seront levées sur la paroi opposée ainsi que les 2 cibles les plus proches sur la paroi où est mise en place la station. Toutefois, ceci est théorique et nous permet seulement d'établir le nombre minimum de points communs qui devront être présents entre deux nuages adjacents.

Il est important de noter que le nombre de stations et de cibles risque de varier en fonction des contraintes opérationnelles (longueur du chantier, hauteur de la paroi, caténaies...etc.).

Annexe 5 : Traitement du nuage scanner

1. Colorisation du nuage de points :

La colorisation du nuage de points se fait en plusieurs étapes bien distinctes :

- Création du panorama
- Création du « cube »
- Application du cube aux nuages de points

1.1 Création du panorama :

Nous utilisons le logiciel payant *PTGui* pour la création du panorama réalisé à l'aide du bras Ninja III et du reflex CANON EOS 5D Mark III.

Nous créons un projet dans *PTGui*, qui correspondra à un panorama donc à une station. En ajoutant les différentes photos nous faisons un premier assemblage en sélectionnant le paramètre « *Equirectangular* » qui est le type de projection que l'on souhaite en sortie. Une première estimation du panorama est faite pour voir si nous avons une erreur sur les photos.

Puis dans un second temps nous relaçons un calcul qui cherche les points communs entre deux couples de photos et calcule un résidu sur tous les points. Si le résultat est « *very good* » ou « *good* » nous pouvons créer le panorama sinon il nous faut éliminer les points qui ont un résidu trop important. Cela signifie tous les résidus au dessus de 10 pixels.

1.2 Création du cube :

Pour la création du cube (illustration A8.1) nous nous servons du logiciel *Pano2QTVR* (payant). En récupérant le panorama réalisé précédemment il crée une projection du panorama sphérique (*Equirectangular*) sur les faces d'un cube (illustration ci-contre).

Dans les dimensions de l'image nous devons choisir un des multiples de 1024 (ex : 512, 1024, 2048, etc.). Cette option est très importante pour le placage des photos sur le nuage de points.

1.3 Placage des images sur le nuage de points :

La colorisation se fait après unification du nuage de points. Après chargement des photos dans le menu *Texture Map Browser* (menu dans *Cyclone*) le recalage des images peut se faire (illustration ci-dessous).

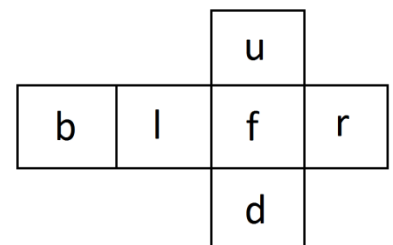


Illustration A8.1 - Cube éclaté

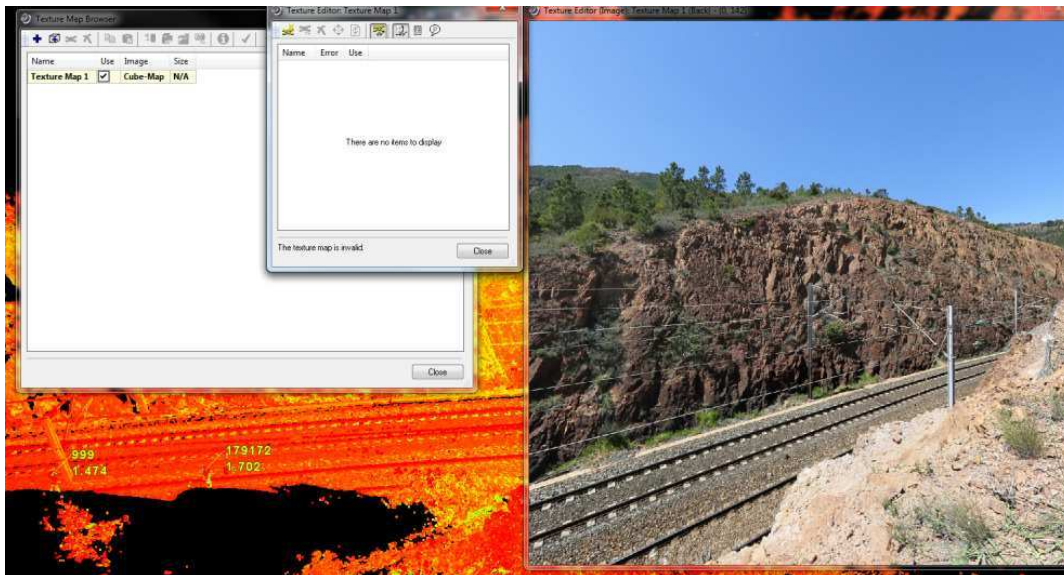


Illustration A8.2 - Fenêtre de sélection des points homologues

Il faut alors sélectionner des points homologues entre le nuage de points et la photo à la main, cette étape permet au logiciel de plaquer la photo sur le nuage, chaque point aura une information radiométrique. Pour que le calage puisse se faire il faut 3 points mais un 4^{ème} point pour contrôle est préférable. Toutefois pour un meilleur calage un plus grand nombre de points est nécessaire.

Généralement nous avons dû pointer entre 5 et 8 points pour avoir une colorisation correcte sur chaque cube. Voici ce que le rendu final du nuage colorisé :

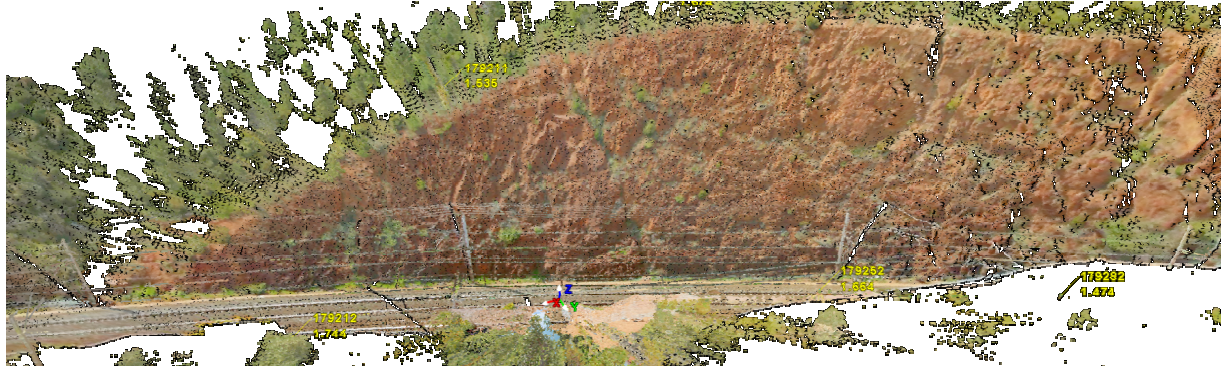


Illustration A8.3 - Nuage de points scanner colorisé

Annexe 6 : Levé photogrammétrie terrestre

1. Levé

Pour ce protocole de levé nous devons également relever les cibles Photomodeler ou cible scan par tachéométrie pour assurer la qualité du modèle afin d'effectuer une mise à l'échelle et un référencement spatial dans le logiciel *Photomodeler Scanner*.

2. Prise des clichés

Pour la prise des photos, nous devons respecter un protocole de prise de vue pour qu'il y ait un recouvrement optimal entre les clichés. Il est schématisé par l'illustration ci-dessous.

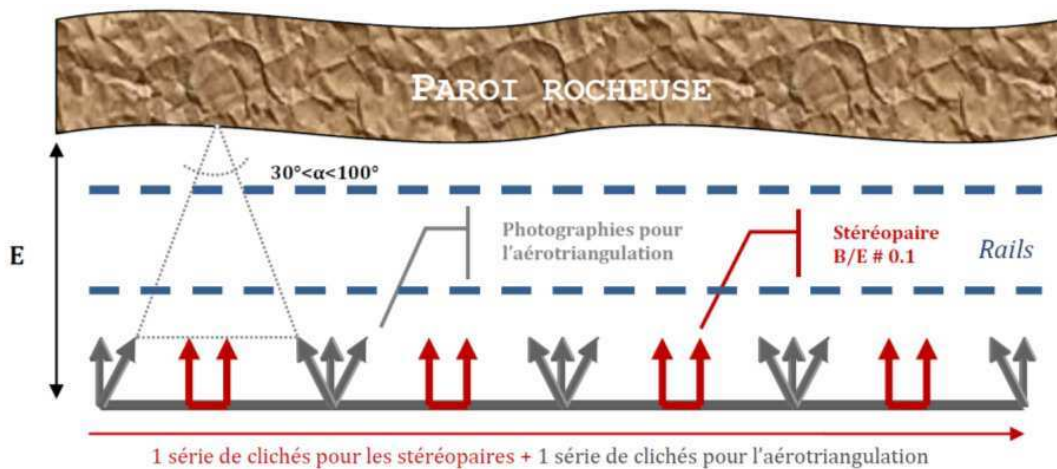


Illustration A9.1 - Protocole de prise de photos - Source : Trochon

Des clichés doivent être pris pour l'aérotriangulation et d'autres pour les stéréoscopies (création du nuage de points).

L'aérotriangulation sert à effectuer l'OAb. Pour cela il faut qu'il y ait un recouvrement minimum entre les clichés, avec des points communs, qui est d'environ 60% transversalement (vert pâle) et 20% verticalement (bleu pâle).

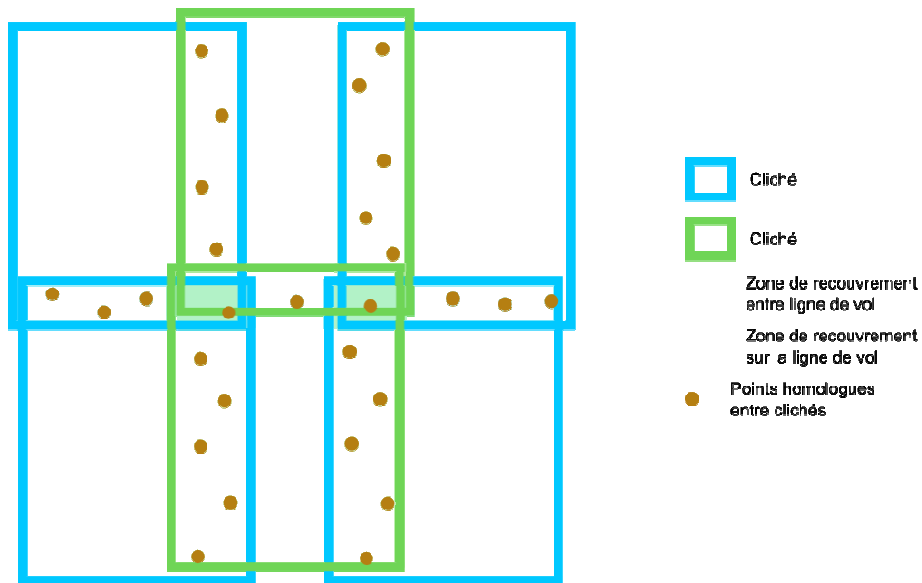


Illustration A9.2 - Positions des points homologues entre clichés

Les points homologues sont nécessaires pour effectuer l'OR et l'OAb. Il en faut au minimum 5 pour effectuer le recalage (3 rotations, 3 translations et le facteur d'échelle), cependant un nombre plus important de points est recommandé pour un meilleur calage et également pour servir de contrôle. Plus le calage est précis, plus la densification de points le sera.

Les stéréopaires serviront pour la densification du nuage de points par corrélation épipolaire dense. Il s'agit de couples de clichés qui sont parallèles et peu éloignés pour un recouvrement optimal de la paroi rocheuse. Ce recouvrement permet de faire de la stéréoscopie c'est-à-dire voir la zone de recouvrement des clichés en perspective : en relief.

Annexe 7 : Étalonnage des appareils

1. Protocole de levé du mur d'étalonnage

La calibration de l'appareil photo est nécessaire pour que les photos soient corrigées de toutes distorsions. Pour cela il faut étalonner à l'aide d'un mur de cibles connues en coordonnées (voir photo ci-dessous).



Illustration A10.1 - Mur d'étalonnage SNCF

Nous devons prendre un minimum de cinq photos (paysage et portrait) de ce mur avec le reflex en respectant certaines règles importantes :

- Mise au point à l'infini (∞)
- Pas de flash (les cibles apparaîtraient blanches car elles sont réfléchissantes)
- Faire en sorte qu'il y ait des cibles dans les coins de l'image et le centre

Une fois les photos prises nous levons les cibles à l'aide d'un tachéomètre en double retournement pour connaître leur position dans un système locale. Ces étapes sont refaites généralement si la dernière calibration date de plus de 2 mois. Cette mesure de sécurité permet de vérifier qu'une cible n'a pas bougé (choc, cible recollée...etc.) et de contrôler les valeurs de calibration de l'appareil photo pour déceler un éventuel défaut du capteur.

2. Calcul des paramètres caméra

Pour calculer les valeurs des paramètres de la caméra (distorsions, focale, taille du capteur, etc.) nous utilisons le logiciel *Photomodeler Scanner*. Après insertion des différentes photos nous choisissons que nous ne connaissons pas les paramètres caméra et qu'ils sont approximés par les valeurs connus dans fichier *Exif* des photos. Pour marquer les cibles une fonction du logiciel permet de les reconnaître automatiquement car ce sont des cibles *Photomodeler* en « white » 12 bits.

Une fois les cibles marquées entre elles et vérifiées pour qu'il n'y ait pas d'erreur sur leur numéro, nous remettons le projet à l'échelle en insérant les coordonnées des cibles dans *Photomodeler Scanner*. Cette étape permet en effet de mettre à l'échelle les photos mais également de fixer la position des cibles durant le calcul. Nous pouvons choisir si les cibles sont fixes ou si elles ont une imprécision qui est au libre arbitre de celui qui fait la calibration. Dans cette calibration, nous avons estimé que les cibles étaient précises à 5 mm près.

Annexe 8 : Création du nuage sous *Photodeler Scanner*

1. Création d'un projet :

Les premières étapes sont les mêmes que pour l'étalonnage : marquage des cibles Photodeler et association du système de coordonnées aux cibles. Après l'OR et l'OAb nous pouvons créer le nuage de points de la paroi en paramétrant certains critères.

2. Densification de points (paramètres, etc.) :

Le nuage de points se calcule à l'aide de plusieurs éléments qui sont :

- La radiométrie du pixel
- Le géoréférencement des clichés entre eux

Dans les paramètres nous pouvons choisir quel pas, c'est-à-dire quel espacement entre deux points du nuage, nous souhaitons. Le pas de 2 cm fût choisi pour obtenir la modélisation la plus réaliste possible considérant des différentes aspérités de la paroi.

Plusieurs paramètres sont également réglables :

- *Matching region radius* : plus la valeur du chiffre est grande plus la zone de recherche du point l'est mais en contre partie le temps de calcul l'est aussi.
- *Texture type* : ce paramètre n'influe pas sur le temps de calcul mais seulement sur la répétition de texture ou non sur le projet. Plus le chiffre est grand et moins la texture se répète et moins il y a de bruit.

Voici des illustrations de la variation du paramètre *Texture type* sur la modélisation 3D d'une armoire de bureau :



Illustration A11.1 - Variation de *Texture type* vue de face - Droite à gauche : T=3, T=2, T=1

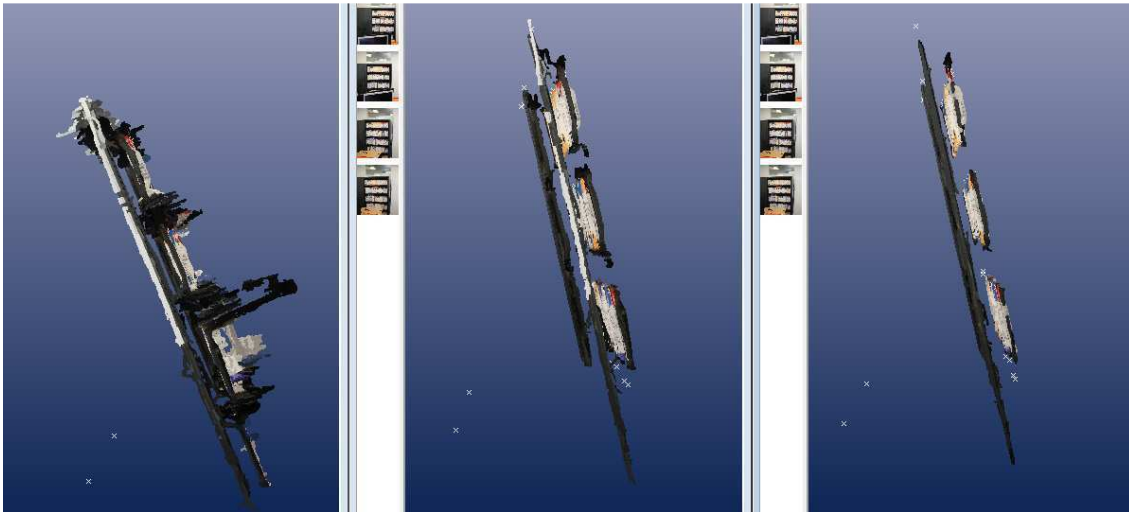


Illustration A11.2 - Variation de *Texture type* vue de côté - Droite à gauche : T=3, T=2, T=1

Après plusieurs tests, je me suis aperçue que les choix initiaux proposés par *Photodeler Scanner* sont généralement les plus adéquats. Le *Process* fait une première approximation de ces valeurs. Elles varient en fonction du projet et des photos.

Synthèse

L'aéromodélisme, qui était jusqu'ici principalement un hobby ou un moyen de démonstration pour des modèles à grande échelle, devient un acteur important des nouvelles méthodes de lever topographique en zones difficiles. À la source de ces avancées technologiques, l'armée développe des drones à capteurs, initialement à des fins de défense, désormais accessibles au grand public. Dans l'optique d'assurer la sécurité des biens et des personnes circulant sur le réseau ferré national, la SNCF souhaite étudier la pertinence de l'utilisation de drones pour les opérations de surveillance et de maintenance des infrastructures. Afin d'analyser cette méthode de relevé innovante nous avons réalisé une analyse technico-économique de cette nouvelle technologie dans le cadre d'une étude de confortement de parois rocheuses, en comparant notamment les données issues de levés réalisés à l'aide d'un drone avec des données acquises par des techniques actuelles déjà éprouvées telles que le scanner laser 3D ou la photogrammétrie terrestre.

Abstract

The model aircraft, which was previously mainly a hobby or a means of demonstration of large-scale models, is becoming an important player in the new methods of land surveying in difficult areas. At the source of these technological advances, the army is developing UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sensors, initially for the purpose of defense, available to the general public from now on. In view of ensuring the safety of goods and people traveling on the national rail network, SNCF wants to evaluate the relevance of the use of drones for surveillance operations and infrastructure maintenance. To analyze this innovative method of survey we conducted an economic analysis of this new technology as part of a study of reinforcement of rock walls, particularly by comparing data from surveys collected by a drone with data acquired by existing mature technologies such as 3D laser scanner or terrestrial photogrammetry.