

(ID Modèle = 454913)

Ineris - 201986 - 2130609 - v2.0

16/12/2020

LiDAR terrestre à longue portée : retour d'expérience dans le contexte d'instabilités de pente



PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol Rédaction : COCCIA Stella - MULLER ROXANE Vérification : KLEIN EMMANUELLE; CONIL NATHALIE Approbation : Document approuvé le 16/12/2020 par BIGARRE PASCAL

Table des matières

1	11	NTR	ODUCTION	6
	1.1	(Contexte et Objectif	6
	1.2	I	Le LiDAR terrestre et les instabilités rocheuses	7
2	L	a teo	chnologie LiDAR	8
	2.1	I	Principes et performances	8
	2.2	I	Déploiement sur le terrain	10
	1	.1.1	Positionnement de l'appareil	10
	1	.1.2	Paramétrage de la prise de mesure	11
	2.3	-	Traitement, résultats et précisions	11
3	E	xem	nples d'applications du LiDAR à longue portée	12
	3.1	I	Etude de reconnaissance dans une carrière en exploitation	13
	3	.1.1	Le nuage de points du site	13
	3	.1.2	L'effet des conditions météorologiques sur la qualité des données	15
	3	.1.3	Synthèse de opérations d'acquisition et traitement de données réalisées	15
	3.2	\$	Scan différentiel d'une falaise côtière érodée	17
	3	.2.1	Les conditions de réalisation des campagnes	17
	3	.2.2	L'évolution du site par scan différentiel	21
	3	.2.3	Synthèse des opérations de traitement de données réalisées	22
	3.3	I	Les données LiDAR à grande échelle pour des calculs de stabilité	23
	3	.3.1	Numérisation du site	24
	3	.3.2	Construction d'un maillage géométrique à partir d'un nuage de points	26
	3	.3.3	Synthèse de opérations de traitement de données	28
4	В	Bilan	et perspectives	29
5	С	Conc	lusions	31
6	R	Reme	erciements	32
7	R	Référ	rences	33
8	А	nne	xes	35

Résumé

La technologie LiDAR présente de nombreux atouts pour la prévention et la gestion du risque d'instabilités de pentes et versants et peut constituer une réelle plus-value pour l'observation et la surveillance de sites et territoires à risque. Elle peut être déployée, selon les cas, en complément ou indépendamment de méthodes instrumentales classiques, basées sur le suivi de grandeurs physiques, à partir de capteurs déployés *in situ*.

Ce rapport, établi dans le cadre de la mission d'appui de l'Ineris aux pouvoirs publics, s'intéresse aux modalités d'acquisition et de traitement des données acquises par scanner laser terrestre (TLS-terrestrial laser scanner) à longue portée. Celles-ci se présentent in fine sous la forme de nuages de points géoréférencés, en trois dimensions, qui peuvent ensuite être exploités à des fins techniques, scientifiques, et même de communication.

Ce rapport présente un retour d'expérience de l'Ineris en la matière, en s'appuyant sur trois cas d'étude *in situ* : la reconnaissance par levé LiDAR d'une carrière à ciel ouvert en exploitation, le suivi par scan différentiel d'une falaise côtière présentant un encorbellement important et l'apport du LiDAR pour l'analyse de stabilité des berges d'un réservoir artificiel. Pour chacun de ces cas, les opérations nécessaires à la production et à l'exploitation d'un nuage de points haute-résolution de la zone cible sont présentées. Ce rapport explicite de manière didactique les paramètres clés de la prise de mesure ainsi que les traitements appliqués. Ceux-ci diffèrent selon les conditions propres à chaque site (extension de la zone cible, accessibilité, présence de végétation, réflectance etc.), selon les conditions météorologiques (luminosité, pluie, brouillard), ainsi que selon la finalité visée. Il aborde également la question du couplage technologique du TLS à longue portée avec le TLS à courte portée et avec le levé sonar.

Si l'acquisition des données semble en apparence facile, les données sont souvent volumineuses et les logiciels associés complexes à manipuler. Les résultats sont par ailleurs étroitement liés aux modalités d'acquisition, par exemple le géoréférencement précis des stations et le recouvrement entre stations. La complexité des traitements à appliquer dépend quant à elle beaucoup des propriétés de la couverture rocheuse (réflectance, humidité, etc.) et des conditions d'acquisition (interférences avec des constructions ou des infrastructures existantes, végétation, conditions atmosphériques).

Enfin, soulignons que les scanner laser de dernière génération sont capables de collecter des paramètres physiques des surfaces imagées (couleur, rugosité, réflectivité, etc.) par l'analyse des signaux réfléchis, permettant ainsi de compléter utilement les nuages de points. Ces fonctionnalités sont à l'étude à l'Ineris, aussi bien pour l'aide au diagnostic de stabilité de géostructures, au suivi des mouvements de terrains que pour la gestion du risque cavité.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 200372 - v2.0 16/12/2020

Mots-clés :

Instrumentation et nouvelles technologies, surveillance, observation, versants, mouvements de terrain, risques gravitaires, LiDAR terrestre, scanner à longue portée

Territoire

France, Europe, Monde.

ABSTRACT

LiDAR technology has many advantages for the prevention and management of rock slope instability hazard and may constitute a solution with real high level added value for the observation and the monitoring of sites at risk. It can be deployed, depending on the case, in addition to or independently of conventional instrumental methods, based on the monitoring of physical quantities thanks to sensors deployed on site.

This report was written as part of Ineris' support mission to the public authorities. It analyses the acquisition and processing methods developed for data acquired by long-range terrestrial laser scanner (TLS). These data consist of 3-dimension georeferenced point clouds, which can then be used for technical, scientific and even communication purposes.

This report presents an Ineris' feedback on this topic, based on three case studies, which are the LiDAR survey of an operational open pit, the monitoring by differential scanning of a natural significantly-corbelled coastal cliff and the contribution of LiDAR for the stability assessment of the banks of an artificial reservoir. For each case, high-resolution point cloud production and analysis of the target area are presented. This report didactically explains the key parameters to be used for the data measurement and processing. They differ according to the site-specific conditions (target area extension, accessibility, presence of vegetation, reflectance, etc.), the meteorological conditions (light, rain, fog), as well as to the intended purpose. The report also addresses the question of long-range TLS with short-range TLS technological coupling and with sonar survey.

While acquiring data seems to be easy, managing large data volume and the associated software is often complex. Moreover, results are closely linked to the acquisition parameters, including e.g. stations georeferencing precision and coverage overlap. Regarding processing complexity, it significantly depends on the properties of the rock cover (reflectance, humidity, etc.) and on acquisition conditions (interference with existing buildings or infrastructure, vegetation, atmospheric conditions).

Finally, the latest-generation laser scanners are noted to enable gathering physical parameters of the scanned surfaces (colour, roughness, reflectivity, etc.) by analysing the reflected signals, thus making it possible to usefully supplement the point clouds. These functionalities are being studied at Ineris, not only to assess the rock engineering structures stability, but also to monitor landslides and to manage cavity hazard.

Key words

Instrumentation and new technologies, monitoring, observation, slopes, ground movements, gravity risks, long-range terrestrial LiDAR

Territory

France, Europe, Word.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et Objectif

Les mouvements de pente regroupent plusieurs typologies d'instabilités qui se différencient selon la nature des matériaux mis en jeu, les volumes mobilisés, le mécanisme d'évolution et la cinétique (Cruden et Varnes, 1996). Etant donné la complexité des mécanismes en jeu et la difficulté à établir des modèles prédictifs, l'observation et la surveillance instrumentale sont désormais considérées comme des composantes clés de la prévention et de la gestion du risque d'instabilité de versant. Ce sujet constitue une préoccupation importante pour les collectivités et les pouvoirs publics qui font face à des problématiques croissantes d'aménagement et d'urbanisation des territoires à risque dans le contexte du changement climatique.

Pour les instabilités de versant, il existe deux grandes catégories de méthodes de surveillance complémentaires. La première catégorie repose sur les méthodes de télémesure multi-paramètres *in situ* basées sur un grand éventail de capteurs adaptés à la mesure des grandeurs physiques pertinentes pour l'instabilité étudiée. Ces capteurs sont installés directement sur le versant. La deuxième comprend les méthodes de surveillance à distance permettant de mesurer les déplacements en surface d'une multitude de points et donc d'appréhender l'évolution d'un versant dans sa globalité (Bosq et Klein, 2013).

En 2013 l'Ineris a publié (Bosq et Klein, 2013) une revue des méthodes innovantes de surveillance en grand de pentes et versants, qui couvrait les dispositifs terrestres mobiles, utilisant les technologies radar et scanner laser, sélectionnés sur la base de conditions simples de mise en œuvre. Le rapport illustrait entre outre le potentiel, les performances, les coûts et conditions de mises en œuvre de ces deux technologies dans le contexte des mouvements de versants au travers d'exemples tirés de la littérature.

A la suite de cette étude, l'Ineris a acquis un scanner laser 3D à courte portée, puis un scanner laser 3D à longue portée (environ 4 km) et s'est doté d'une palette de logiciels de traitement et analyse de données LiDAR. Ces outils ont été utilisés dans différents contextes et avec différents objectifs, y compris dans le domaine du risque d'instabilités de pente, comme cela se pratique désormais beaucoup (Jaboyedoff et al., 2012). L'avantage principal de la technologie LiDAR est sa capacité à collecter une grande quantité de données qualitatives à haute résolution dans des temps relativement courts. Les données acquises donnent une information spatiale précise et détaillée de la zone numérisée par le scanner, information difficile à obtenir par observation ou surveillance géotechnique classique. Par rapport à la technologie scanner laser terrestre (TLS- terrestrial laser scanner) à courte portée le TLS à longue portée permet de numériser des zones relativement éloignées (jusqu'à 4 km), de grandes dimensions, parfois difficilement accessibles et ce pour des coûts assez faibles, comparativement à l'utilisation d'un drone ou d'un hélicoptère avec capteurs embarqués. Enfin, les données peuvent conduire à différents types de résultats : des reconnaissances de site, des modèles numériques de terrain (MNT ou DEM - Digital Elevation Model) à très haute résolution, des analyses de stabilité avec intégration de modèles géométriques précis dans des modèles numériques 2D et 3D et d'autres calculs divers, comme la trajectographie de chutes de blocs, la géologie, la fracturation, etc.

Le présent rapport, établi dans le cadre de la mission d'appui de l'Ineris aux pouvoirs publics, a pour objectif de présenter les résultats acquis avec le scanner à longue portée dans trois contextes différents d'instabilités de pente et pour lesquels des objectifs différents étaient visés. Il présente de ce fait également un premier retour d'expérience sur l'évaluation de la technologie scanner laser terrestre à longue portée.

Les trois exemples de mise œuvre du LiDAR à longue portée présentés dans ce rapport illustrent à la fois les domaines d'intervention usuels de l'Ineris en matière de gestion de risques d'instabilité de terrain ainsi que certaines potentialités des données LiDAR. Le premier cas d'étude est celui d'une carrière à ciel ouvert en exploitation, affectée par le passé par des glissements de terrains, pour laquelle une reconnaissance à l'échelle du site est réalisée. Le deuxième exemple est celui d'une falaise côtière marquée par un encorbellement important : son évolution au cours du temps est observée par scan différentiel, Enfin le troisième cas d'étude concerne le levé LiDAR 3D des abords d'un lac artificiel créé par l'ennoyage d'une ancienne mine de charbon à ciel ouvert pour lequel des modélisations numériques visant à évaluer la stabilité de ses pentes ont été réalisés à partir du nuage de points obtenu.

Il est à noter que pour le deuxième cas d'étude qui concerne la falaise côtière, le TLS à longue portée a été couplé avec le TLS à courte portée pour les levés en pied de falaise, dans les zones facilement

accessibles. Pour le troisième cas d'étude, le lac artificiel, le levé LiDAR à longue portée a été couplé à un levé sonar pour reconstituer avec précision la géométrie complète du réservoir et de ses berges.

Ces trois cas d'étude sont présentés et détaillés dans ce rapport avec l'objectif de faire un point méthodologique sur l'utilisation du scanner terrestre à longue portée en abordant sa déployabilité, ses performances, ses limites d'utilisation, etc... Au préalable un court rappel est fait sur la technologie LiDAR en général et son déploiement.

1.2 Le LiDAR terrestre et les instabilités rocheuses

La technologie LiDAR a suscité dès son apparition sur le marché, un grand intérêt et sa diffusion a été assez rapide. En conséquence, la littérature scientifique sur le sujet est riche, notamment concernant la thématique observation et surveillance des mouvements de pente (Derron and Jaboyedoff, 2010).

Dans les industries extractives, notamment dans les mines et les carrières à ciel ouvert (Vanneschi et al, 2017), le personnel et les engins sont souvent exposés à l'aléa mouvements gravitaires et l'exploitation peut être un facteur aggravant pour des instabilités déjà existantes. Le scanner à longue portée permet alors de numériser et surveiller à distance, périodiquement, les instabilités et leurs déplacements sans exposer le personnel intervenant à des chutes de blocs ou à des glissements de terrains. Une des applications la plus utilisée dans les carrières et dans les mines est par ailleurs celle du calcul du volume de minerai excavé (Luo et al., 2008) à partir de levés LiDAR.

Dans le cas du suivi de l'évolution d'une falaise rocheuse, la comparaison de levés LiDAR est utilisée depuis les années 2000 pour la surveillance / l'observation périodique (Dewez et al., 2013 ; Rosser et al., 2013 ; Lague et al., 2013 ; Gulyaev and Buckeridge, 2004 ; Rosser et al., 2005 ; Lim et al., 2015.). Cette comparaison a donné des résultats intéressants pour étudier l'érosion des falaises (Collins and Sitar, 2008 ; Letortu et al., 2015 ; Lim et al., 2010 ; Rosser et al., 2007 ; etc.). En 2003 notamment, Rosser et al. (2005) ont fait le choix d'utiliser le TLS à courte portée pour la surveillance périodique (de 2003 à 2004, pendant 16 mois) des fractures d'une falaise du nord du Yorkshire (UK). La comparaison des cinq levés avait permis d'analyser avec précision la fracturation de la falaise et d'en étudier la stabilité et son évolution dans le temps. Dans ce cas d'étude, les informations spatiales du TLS avaient été couplées avec la photogrammétrie terrestre. Plus récemment, d'autres couplages de la technologie TLS avec d'autres méthodes de surveillance plus classiques ont été exploités (Martino et Mazzanti, 2014 ; Letortu et al., 2019 ; Westoby et al., 2018 ; Francioni et al., 2018). Par exemple, Martino et Mazzanti (2014) ont couplé une campagne de relevés visuels de fractures d'une falaise du sud de l'Italie avec un levé LiDAR pour aboutir à une caractérisation géomécanique précise du site. Letortu et al. (2019) ont comparé, en termes de coûts, de performance et de précision, les levés réalisés par scanner terrestre avec ceux réalisés par photogrammétrie terrestre et aéroportée par drone dans le cadre de la surveillance d'une falaise en Normandie (Petit Ailly à Varengeville-sur-Mer). Ces auteurs soulignent que ces trois méthodes sont complémentaires, chacune avec ses limites et incertitudes. Ils indiquent que le choix de l'une ou de l'autre technologie se fait en fonction de l'échelle du site et des moyens alloués à chaque projet. En revanche en termes de précision, les levés par TLS semblent être à privilégier par rapport aux autres levés. Concernant la falaise étudiée le TLS (avec une précision pluri-centimétrique ± 0,03 m) a permis de détecter différentes chutes de blocs pendant la période de surveillance (Letortu et al., 2019).

Enfin, on observe de plus en plus que les données acquises avec les nouvelles technologies comme le TLS à longue portée ou le LiDAR aéroporté (LA) peuvent être utilisées comme données d'entrée (sous forme de modèle géométrique) de modélisations numériques ayant comme objectif de faire des analyses de stabilité et calculer le facteur de sécurité (FS) de pentes plus ou moins complexes (Brideau and Stead, 2010; Brideau et al., 2011; Stead and Coggan, 2012; Salvini et al., 2011, 2013; Francioni et al., 2014, 2015; Stead and Wolter, 2015; Spreafico et al., 2016, 2017, Francioni et al., 2018 ; etc.). Les données acquises par ces technologies donnent des informations détaillées sur la géométrie de pentes complexes et instables et sont d'autant plus importantes quand les versants ne sont pas accessibles. Le constat général fait par tous les auteurs est que les résultats des calculs de stabilité via les modélisations sont plus précis si on utilise comme donnée d'entrée un modèle géométrique obtenu via un levé TLS, au lieu d'un modèle géométrique obtenu avec un relevé visuel. Le temps de calcul pour les simulations numériques est en conséquence plus long, mais peut être réduit dans le cas de simulations 2D.

2 La technologie LiDAR

2.1 Principes et performances

Le scanner laser ou LiDAR (Light Detection And Ranging appelé parfois aussi LADAR) est une technologie de télédétection optique née dans les années 1960 pour mesurer avec précision des distances. Avec l'intégration de la mesure des angles de visée et les récentes évolutions technologiques, cette technologie s'est diffusée dans de nombreux domaines, y compris pour étudier et surveiller les mouvements de pente (Carter et al., 2001 ; Slob et al., 2002 ; Haugerud et al., 2003 ; Slob et Hack, 2004, etc.).

Un scanner laser est un appareil de numérisation et d'acquisition 3D qui repose sur l'utilisation d'ondes lumineuses (ondes électromagnétiques visibles) générées par laser. Celles-ci sont projetées vers la cible à imager, qui les réfléchit. Petrie et Toth (2008) présentent avec précision les principes de base de fonctionnement d'un laser scanner terrestre.

Il existe aujourd'hui trois types de scanner laser terrestre :

- Le scanner à « temps de vol » ou à impulsion. Ce type d'instrument détermine la distance scanner-objet par mesure du temps entre l'impulsion émise et l'impulsion reçue. Le temps de vol est ensuite converti en distance, connaissant la vitesse de la lumière dans l'air (Hiremagalur et al., 2007, cf. Figure 1). Ce type de scanner n'est capable d'émettre une nouvelle impulsion qu'après réception de la précédente, ce qui est un inconvénient dans la rapidité d'acquisition des données. Cet appareil est adapté aux mesures précises à longue portée ;
- le scanner laser à « mesure de différence de phase ». Dans ce cas la distance scanner-objet est déterminée en comparant les phases des ondes émises par le scanner vers l'objet et les phases des ondes de retour à l'aide d'un phasemètre numérique (Hiremagalur et al., 2007, cf. Figure 1). Cette technologie est adaptée pour numériser de façon rapide des objets peu éloignés ;
- le scanner laser « dit hybride ». Ce dernier utilise la technologie « Wave form Digitizer » (WFD) qui mélange les deux précédentes (Biasion et al., 2019). Ce type de technologie allie les avantages de rapidité d'acquisition et de précision des mesures.

Le scanner ne mesure pas seulement la distance à l'objet, mais aussi les angles horizontaux et verticaux selon lesquels le faisceau laser a été projeté. Cette dernière mesure permet de calculer la position du point éclairé dans son référentiel (coordonnées sphériques des points dans un repère centré sur le scanner). En répétant l'opération un très grand nombre de fois, c'est-à-dire déplaçant l'appareil pour imager des zones masquées, puis en assemblant les scans successifs, il est possible d'imager l'ensemble de la scène. Certains appareils sont également capables d'identifier des paramètres physiques des surfaces imagées (couleur, rugosité, réflectivité, etc.) par l'analyse des signaux réfléchis, permettant ainsi de compléter utilement les levés 3D (Jaboyedoff et al., 2012).



Figure 1 : représentation du fonctionnement (modifiée à partir de Hiremagalur et al., 2007) du scanner à différence de phase (en haut) et du scanner à temps de vol (en bas)

Les ordres de grandeurs des principales performances et les caractéristiques des scanners laser du marché sont listés dans le tableau ci-dessous. Ils sont une compilation d'informations techniques fournies par les constructeurs, obtenues dans des conditions généralement plus favorables que celles obtenues en conditions de terrain usuelles. Elles tiennent également compte de compensations liées aux conditions atmosphériques.

Scanner laser terrestre (TLS)						
Précision absolue	~ 1 cm à 100 m de distance					
Portée	de 100 m à 6 km					
Temps d'acquisition	variable selon la surface surveillée (~15 mp pour une application standard)					
Fréquence d'acquisition	≤ 300 KHz					
Longueur d'ondes	0,78 µm à 1 mm					
Champ de vision	360° à l'horizontale et jusqu'à 80° à la verticale					
Poids de l'équipement	entre 20 et 45 kg					

Tableau 1 : principales caractéristiques et performances des solutions scanner terre	estre
(modifiées d'après Bosq et Klein, 2013)	

Quel que soit l'appareil, la précision moyenne est comparable, elle est infracentimétrique à pluricentimétrique selon les conditions. La portée en revanche est très variable selon les modèles : elle peut être très courte (quelques mètres) à très longue (quelques kilomètres). Pour cette raison on parle de scanners à courte ou longue portée. La portée d'un scanner joue sur son prix, qui peut varier de quelques milliers d'euros à quelques centaines de milliers d'euros. Le choix d'un scanner à courte ou longue portée dépend de la distance de la cible, des conditions d'accès et de la dimension de l'objet à numériser. La portée est dépendante de la réflectance du versant surveillé, des conditions atmosphériques et de la fréquence de mesure. La Figure 2 illustre très bien cette dépendance dans le cas du scanner Riegl VZ-4000 à longue portée (cf. fiche technique en annexe 1). Elle montre que pour une fréquence d'acquisition donnée (étant le taux de répétition des impulsions laser et définie par l'utilisateur), la portée sera maximale sur les surfaces les plus réflectives (exemple : 4 km sur des matériaux réflectifs à 85% pour une fréquence d'acquisition de 23 000 points par seconde (30 kHz) courbe bleue sur le graphique de gauche - contre 1,5 km sur une surface réflective à 20% avec la même fréquence d'échantillonnage). Cette figure illustre également l'effet des conditions atmosphériques sur la portée. Par exemple, pour une surface réflective à 85% et une fréquence d'échantillonnage de 30 kHz, la portée maximale est de 4 km pour une atmosphère claire permettant une visibilité de 23 km (courbe bleue sur le graphique de gauche). Cependant, dans les mêmes conditions, mais en présence de brouillard la portée maximale est réduite à 2,2 km (courbe orange sur le même graphique). Enfin, cette figure montre également l'effet de la fréquence d'échantillonnage sur la portée. Dans des conditions identiques, la portée obtenue avec un échantillonnage à 300 kHz est environ la moitié de celle obtenue avec un échantillonnage à 30 kHz.



Figure 2 : portée du laser scanner à impulsion Riegl VZ-4000 en fonction de la réflectance de la cible, des conditions atmosphériques et de la fréquence d'acquisition (données constructeur). Le terme MTA pour Multiple-Time-Around caractérise le nombre de pulse émis (source fiche technique scanner Riegl VZ-4000, cf. annexe 1)

2.2 Déploiement sur le terrain

1.1.1 Positionnement de l'appareil

Bien que le poids de l'appareil et de ses accessoires puisse atteindre une quarantaine de kilogrammes (cf. Tableau 1), le déploiement du scanner sur le terrain est relativement facile. L'installation sur site et la numérisation des données se font rapidement : la mise en place prend au plus une demi-heure, sous réserve que les lieux propices au positionnement de l'appareil (appelées stations de mesure ou stations dans la suite du document) aient été préalablement définis.

Un travail préparatoire est en effet nécessaire pour définir les stations. Celles-ci sont choisies de manière à avoir à la fois un angle de visée le plus frontal possible par rapport à l'objet à numériser et à couvrir l'ensemble de la scène et ses abords en réduisant au mieux les zones de masques ou zones d'ombres (c'est-à-dire les zones non éclairées par le faisceau laser) liées au relief.

La durée de la prise (ou cycle) de mesure pour une station est variable selon l'appareil utilisé, le contexte de mise en œuvre et le paramétrage (fréquence, résolution angulaire, prise de photo, etc.). Pour des mesures de longue durée, il faut être vigilant quant à la capacité des batteries et de la mémoire du scanner. Il est souvent utile d'avoir à disposition un PC de terrain et un disque dur pour le déchargement des données (s'agissant de données volumineuses ce transfert peut être long et cela est également à prendre en compte).

Comme évoqué précédemment, le scanner est un dispositif de mesure mobile qui fait des mesures selon un angle de visée. Aussi, pour imager avec une bonne précision un objet géologique dans sa globalité, il est souvent nécessaire de multiplier les stations de mesure, tout en veillant à avoir un bon recouvrement entre les nuages de points. Pour ce faire il faut bien paramétrer l'ouverture horizontale. Un recouvrement optimal entre les différentes stations permet ensuite, lors du traitement, d'assembler tous les nuages de points pour obtenir un seul nuage de points. L'ajout de plusieurs stations de mesure avec une vue dégagée, quand c'est possible, permet d'augmenter le nombre de points et en conséquence la densité de points, ce qui revient à améliorer la précision de la mesure.

Dans l'éventualité de levés 3D successifs pour la réalisation d'un suivi périodique, la position des stations doit être marquée au moyen de repères et relevée avec un récepteur GNSS (système de navigation et positionnement par satellites) centimétrique lors de la première campagne de mesure. L'objectif est de garantir les mêmes caractéristiques et les mêmes angles de vues entre chaque levé en se repositionnant strictement aux mêmes endroits afin de pouvoir comparer les nuages de points.

Notons qu'une fois sur site les conditions météorologiques peuvent influencer la numérisation, en particulier la présence de brouillard qui empêche le faisceau du laser d'atteindre la cible. La pluie a aussi un impact sur la numérisation, car elle génère une série de points aberrants (gouttes d'eau) qu'il faut ensuite nettoyer lors du traitement des nuages de points acquis. Cette opération peut prendre beaucoup de temps en post traitement si l'extension du site est importante.

1.1.2 Paramétrage de la prise de mesure

Le scanner effectue un balayage laser selon le paramétrage défini par l'opérateur sur le terrain. Le paramétrage consiste à définir (Kamerman, 1993 ; Lichti and Jamtsho, 2006 et Petrie and Toth, 2008) :

- <u>la résolution linéaire</u> : il s'agit de la fréquence d'acquisition ou d'échantillonnage qui définit la capacité d'un scanner à mesurer de façon indépendante deux objets sur la même LOS (Line Of Sight- ligne de visée). La fréquence est choisie selon la distance scanner-cible, selon la réflectance de l'objet et les conditions météorologiques. Par exemple, si la station se trouve à une distance de 3 000 m de l'objet, et si l'objet a une réflectance de 40%, dans des bonnes conditions météorologiques, pour garantir l'acquisition à cette distance il faudra choisir une fréquence de 30 kHz (cf. Figure 2);</u>
- <u>la résolution angulaire</u> : il s'agit de la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes. Pour définir cette résolution il faut définir les angles d'impact du laser pour délimiter l'ouverture du scan à l'horizontal et à la verticale. En général, on parle d'ouverture horizontale et verticale du scanner. Elles sont définies de façon à permettre un bon recouvrement entre stations pour pouvoir bien imager l'objet dans sa totalité.

Ces deux paramètres vont influencer la résolution du scan. La résolution détermine le niveau de détail qu'on pourra observer dans le nuage de points.

Les scanners laser les plus récents sont couplés à une caméra numérique (généralement intégrée directement dans le scanner) qui permet d'associer à chaque impulsion une information de couleur RGB (en français RVB- Rouge, Vert et Bleu) issue de l'intensité laser de retour. La prise de photo doit également être paramétrée, de la même manière qu'un appareil photo normal. Finalement, ce qu'il faut retenir est que l'intensité laser de retour dépend des paramètres suivants :

- La distance scanner-objet ;
- L'angle d'incidence du laser ;
- La réflectance de l'objet (albédo) ;
- L'atténuation du signal dans l'atmosphère.

2.3 Traitement, résultats et précisions

Le résultat d'un levé LiDAR est un nuage de points géoréférencés, plus ou moins dense suivant la cadence d'émission du laser (fréquence), les dimensions et les propriétés de l'objet numérisé, donnant une information spatiale 3D précise. Pour chaque nuage de points le nombre de points et la densité de points sont connus. Cette dernière est le nombre de points mesurés par unité de surface à distance scanner-objet fixe. Un nuage de points dense donnera une information spatiale plus détaillée. Cette densité sera fonction du paramétrage choisi par l'utilisateur lors de chaque scan (cf. 0) et des conditions météorologiques (par ex. présence de brouillard) et sur le terrain (par ex. présence abondante de végétation) lors de l'acquisition. En général, pour le TLS elle varie entre 50 et 10 000 pts/m2 (Jaboyedoff et al., 2012).

Concernant la précision d'un scanner laser, elle est en général de l'ordre de 1,5 cm à une distance de 800 - 1000 m (Manetti and Steinmann, 2007) dans des conditions idéales. Dans la réalité, elle dépend de plusieurs facteurs :

 des conditions atmosphériques ou environnementales (température, pression, humidité, excessive luminosité, vibrations, vent, etc.), notamment pour les stations éloignées de plusieurs centaines de mètres;

- des caractéristiques de la cible impactée par le laser (réflectance, humidité de la roche, etc.) et la présence d'une éventuelle couverture végétale au droit de la zone d'impact du laser ;
- du bruit de mesure intrinsèque au scanner laser lui-même ;
- des choix de paramétrage de l'utilisateur, comme l'angle d'impact du laser (ouvertures verticale et horizontale) et la distance scanner-cible élevée ;
- des choix de post-traitement du nuage de points, notamment le géoréférencement indirect. Si des erreurs ont été faites pour la prise des coordonnées, ces erreurs se répercuteront dans l'assemblage des nuages de points.

Les points constituant le nuage sont géoréférencés. Si le scanner a un GPS intégré, on parlera de géoréférencement direct. Si ce n'est pas le cas un des premiers traitements à faire est le géoréférencement indirect qui consiste à injecter les coordonnées de certains points caractéristiques (sur lesquels des cibles ont été positionnés) du levé une fois ce dernier terminé. A noter que ce type de géoréférencement peut être aussi utilisé pour améliorer le géoréférencement direct.

Pour le traitement des nuages de points il existe un grand nombre de logiciels payants et gratuits. Certains sont fournis avec l'achat du scanner. Ils demandent une formation dédiée car le traitement des données peut rapidement s'avérer complexe ; il nécessite du personnel technique spécialisé.

Une des premières étapes du traitement est le « nettoyage » ou la réduction du bruit des nuages de points, qui consiste notamment à enlever les points isolés (aberrants) et enlever la végétation. Cette opération peut être faite à la main ou via l'application de filtres numériques. Un des problèmes principaux dans le traitement des données LiDAR est la suppression de la végétation (Harding, 2008) qui peut créer un manque de données en fonction de leur quantité initiale. Les formes d'ondes (quand le scanner fournit ce type d'information) peuvent alors être utilisées pour s'affranchir de la végétation (Duong, 2006; Harding, 2008 et Heritage and Large, 2009). Ces formes d'ondes sont obtenues hors ligne, c'est-à-dire après l'acquisition sur le terrain.

Si plusieurs stations ont été réalisées, plusieurs nuages de points géoréférencés seront alors disponibles. Il faut les assembler pour obtenir un nuage de points de l'objet 3D dans sa globalité. Cet assemblage peut être fait avant ou après l'opération de nettoyage, c'est à l'opérateur selon son expérience de choisir sa stratégie de traitement. Toutefois, pour que l'assemblage soit efficace il faut garantir un bon recouvrement entre les nuages de points des différentes stations. Le bon recouvrement est assuré par le nombre de stations choisi et le paramétrage de la prise de mesure (distance et ouvertures verticale et horizontale du scanning, cf. 1.1.2). L'assemblage consiste à trouver automatiquement les points « homologues » dans les différents nuages de points. L'assemblage par la méthode ICP (Iterative Closest Points) ou méthode du point itératif le plus proche (Besl and McKay, 1992 ; Chen and Medioni, 1992) est la plus couramment utilisée. En utilisant cet algorithme, les différences entre les points sont réduites de manière itérative par une minimisation d'une fonction de coût de l'erreur quadratique moyenne.

Après ce traitement « numérique » on passe à un traitement appelé « graphique », le nuage de points final peut être colorisé si des photos ont été prises. Si les conditions météorologiques sont mauvaises (comme la présence de brouillard) la prise de photo est difficile, l'opération de colorisation des nuages de points sera alors impossible à réaliser. Les nuages de points seront colorisés par défaut en gris ou il est possible d'attribuer une couleur différente au nuage de points de chaque station de mesure.

Après le traitement, le nuage final de points pourra être valorisé de différentes façons : il est possible d'obtenir un modèle numérique de terrain (MNT ou DEM) assez détaillé (Ardizzone et al., 2007 et Jaboyedoff et al., 2008a), qui est l'application la plus courante de cette technologie notamment dans la cartographie des risques naturels.

Toutefois, les nuages de points peuvent être utilisés pour d'autres types d'applications, par exemple dans le cas des mouvements de pente les utilisations peuvent être classées en 4 types (Jaboyedoff et al., 2012) : détection et caractérisation de l'instabilité (1), analyse de l'aléa et cartographie de la susceptibilité (2), modélisation (3) et surveillance (4).

3 Exemples d'applications du LiDAR à longue portée

Dans les paragraphes qui suivent une synthèse de trois cas d'application de TLS à longue portée est présentée, en mettant en évidence pour chaque cas d'étude : l'objectif, les moyens utilisés et les résultats obtenus.

3.1 Etude de reconnaissance dans une carrière en exploitation

À cheval sur la Mayenne (53) et la Sarthe (72) dans la région des Pays de la Loire, la carrière de Voutré est née avec le train, en 1858, pour fournir les pierres nécessaires aux travaux d'aménagements de Paris par le baron Haussmann. L'exploitation a lieu aujourd'hui dans la fosse de la Massoterie. Le gisement s'intègre dans l'ensemble géologique connu sous le nom de « Synclinal des Coëvrons » au sein duquel se sont intercalées différentes roches volcaniques et volcano-sédimentaires, dont notamment les « pyroclastites de Voutré » sur une longueur de près de 3 km. L'exploitation s'appuie sur son flanc nord sur deux configurations géométriques et géologiques distinctes (cf. Figure 3) : à l'est des gradins taillés dans la formation dite « de lahar », et à l'ouest un « glacis », plan incliné d'angle de l'ordre de 45°, sans gradin intermédiaire. C'est sur cette dernière zone qu'en 2013 et 2016 se sont produites des instabilités de versants, de type glissement banc sur banc, favorisées par l'absence de butée de pied au sein de la plateforme d'exploitation. Notre étude de reconnaissance par scanner terrestre à longue portée a été réalisée sur ce glacis, d'environ 1,5 km de longueur.



Figure 3 : localisation des carrières de Voutré (fosse de Massoterie) avec les positions des 4 stations de mesure LiDAR (source : google Earth)

Dans un premier temps un seul relevé LiDAR à longue portée a été réalisé afin de faire une première reconnaissance de cette carrière en exploitation. Lors d'une prochaine campagne LiDAR ce relevé sera considéré comme état « zéro » et permettra une comparaison entre nuages de points afin de vérifier l'évolution du site.

3.1.1 Le nuage de points du site

Le premier relevé par TLS à longue portée de la carrière de Massoterie s'est déroulé les 22 et 23 Novembre 2018. Pour ce relevé 4 stations ont été définies (cf. Figure 3) selon l'accessibilité du site et afin d'avoir un bon recouvrement entre les différents nuages de points (cf. Figure 4). Le choix de la position des stations a été piloté aussi par les inspections visuelles et géotechniques réalisés par l'Ineris par le passé sur le site. Les stations ont été marquées au sol et levées avec un récepteur GNSS¹ de précision centimétrique

Le nuage de points après assemblage des 4 stations est composé de 455 953 636 points (cf. Figure 4).

¹ Récepteur GNSS utilisé : Trimble Geo 7X avec antenne Zephyr 2



Figure 4 : nuage de points final, après assemblage des 4 stations (total 455 953 636 points). Le code couleur est : rouge pour le nuage de points de la station 1, vert pour le nuage de points de la station 2, rose pour le nuage de points de la station 3 et bleu pour le nuage de points de la station 4

Pour chaque station de mesure, le détail des caractéristiques des nuages de points (nombre des points, ouverture horizontale, distance pour un point donné et densité de points) est donné dans le Tableau 2.

Stations	Distance	Fq	Ouverture	Ouverture	Résolution	Nombre	Densité
	(m)	(kHz)	hor.	vert.	angulaire	de points	de
			(°)	(°)	(°)		points /m ²
1	200	150	60	60	0,003	191 191 526	7500
2	420	150	150	60	0,0041	201 973 576	352
3	220	150	40	60	0,0056	35 128 326	255
4	300	30	70	60	0,0097	27 660 208	307

Tableau 2 : caractéristiques des nuages de points pour chaque station de mesure
(avant nettoyage des points aberrants)

La fréquence d'acquisition a été définie en fonction de la réflectance de la roche, de la distance et de la météo (cf. 2.2). Une fréquence de 150 kHz a été choisie pour 3 des stations sur les 4. L'ouverture horizontale a été définie pour pouvoir assurer un bon recouvrement entre les différentes stations. L'ouverture verticale a été fixée à 60° pour les 4 stations, cette valeur assure un bon champ de vision à la verticale. La résolution angulaire dans les plans horizontal et vertical (cf. 0) donne la résolution spatiale (mesure de façon indépendante de deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes). Les valeurs de la résolution angulaire ont été choisies pour avoir une résolution spatiale entre 0,2 et 2 mm.

L'acquisition a nécessité deux jours sur le terrain. L'objet à numériser était le glacis, situé en face de la station 4, sur une longueur d'environ 1,5 km. La station 4 seule ne permettant pas de l'imager, d'autres stations ont été alors choisies et scannées avec l'objectif d'imager toute la carrière et disposer d'un nuage de points final complet pour une reconnaissance in extenso de la carrière en exploitation.

Une grande ouverture horizontale (150° cf. Tableau 2) a été paramétrée pour la station 2, afin de pouvoir assurer une couverture totale de la zone à numériser. Le temps d'acquisition pour cette station a donc été plus important que les autres stations. A défaut de cette grande ouverture horizontale, il aurait fallu lever plus de stations, ce qui aurait également engendré une augmentation du temps d'acquisition sur le terrain et du temps de traitement et d'assemblage des nuages de points.

Il est à noter que selon la distance des stations et l'ouverture horizontale, le nombre de points obtenu est différent (cf. Tableau 2). Un nombre de points plus élevé ne veut pas forcement dire que le nuage aura une densité de points plus élevée. Dans ce cas d'étude, la station qui a un nombre de points le plus élevé est la station 2, mais la station qui a la densité de points la plus élevée est la station 1 qui est moins éloignée par rapport à la cible (200 m contre 420 m) et réglée avec une ouverture horizontale inférieure à celle de la station 2 (60° versus 150°).

A distance équivalente de la cible (stations 1 et 3, situées respectivement à 200 et 220 m de distance de la cible) et à même fréquence d'acquisition, la station qui a une densité de points la plus importante est la station 1 en raison de sa plus grande ouverture horizontale (60° versus 40°).

Une densité de points plus élevée se traduit par une densité d'information plus élevée. On a vu que ce paramétrage dépend des caractéristiques de la roche et des conditions météorologiques pendant l'acquisition, ces dernières dans certains cas peuvent dégrader la numérisation (présence de brouillard, cf. Figure 5) ou l'enrichir de points aberrants (pluie et neige).

La précision des mesures LiDAR de cette campagne a été d'ordre pluri-centimétrique.

3.1.2 L'effet des conditions météorologiques sur la qualité des données

Lors de la numérisation de la carrière les conditions météorologiques n'étaient pas optimales. Un important brouillard a dégradé la qualité de la numérisation et les résultats ne sont pas complètement exploitables. Les impulsions du laser peuvent en effet être réfléchies ou déviées par diffraction lorsqu'elles parviennent à traverser les gouttes de pluie, conduisant généralement à l'absence de données, la pollution du nuage par des points parasites et du bruit accru sur les mesures.

Ceci se traduit par des trainées noires sur le nuage de points 4 (cf. Figure 5). Précisions que le brouillard a également empêché la prise de photos pour la colorisation des nuages de points. Il peut expliquer les écarts de nombre de points selon les stations (cf. Tableau 2).

Le paramétrage de l'acquisition ainsi que ces conditions météorologiques peu favorables ont rendu le traitement et l'assemblage des nuages de points plus difficiles, néanmoins une première reconnaissance du site a pu être réalisée (cf. Figure 4).

3.1.3 Synthèse de opérations d'acquisition et traitement de données réalisées

La Figure 6 synthétise les différentes étapes qui ont conduit à l'acquisition et au traitement des données LiDAR à longue portée dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'opérations standards (comme le nettoyage des points aberrants et l'assemblage des stations, etc.) qui se retrouvent également dans les autres cas d'applications avec les spécificités propres à chaque site.

Dans ce cas, la valorisation a porté sur la réalisation d'un nuage final de points pour pouvoir faire une première reconnaissance du site. Ce nuage pourra être ultérieurement traité pour produire un MNT à utiliser comme base pour d'autres calculs ou pour faire de la cartographie dans un logiciel de type SIG (Système d'Information Géographique).



Figure 5 : impact des conditions météorologiques (brouillard) sur l'acquisition TLS, en haut exemple du nuage de points de la station 4, dans le cercle rouge les grandes trainées noires dues au brouillard. En bas une photo montrant le brouillard lors de l'acquisition



Figure 6 : logigramme des opérations réalisées pour la reconnaissance de la carrière en exploitation

3.2 Scan différentiel d'une falaise côtière érodée

La citadelle de Bonifacio est caractérisée par un bâti ancien et dense situé en aplomb d'un pied de falaise très érodé, qui présente un encorbellement d'environ 20 mètres. Le secteur est particulièrement exposé à l'aléa mouvement de terrain (cf. Figure 7) et deux types de phénomènes sont redoutés : les chutes de petits blocs (<1 m³), posant essentiellement un problème pour les éventuels promeneurs en pied de falaise et l'effondrement en grande masse (environ 1 000 m³), comme cela s'est déjà produit par le passé (Cerema, 2014).

Entre 2018 et 2019, l'Ineris a réalisé plusieurs levés LiDAR avec comme premier objectif de réaliser un état initial, puis de suivre, par comparaison avec l'état initial, l'évolution de la falaise notamment en termes de chutes de blocs, d'érosion et d'évolution des fractures majeures affectant le site. Le site étant de grande extension et ouvert sur la mer, l'utilisation d'un scanner à longue portée était ici impérative pour imager l'ensemble de la falaise depuis des stations placées le long du rivage. Les levés à longue portée ont de plus été complétés par des levés en pied de falaise, dans les secteurs accessibles à pied, avec un appareil à courte portée. L'objectif était de réduire au mieux les éventuels effets de masques à longue distance pour fournir un nuage de points avec la plus haute résolution possible.



Figure 7 : carte d'aléa de la ville de Bonifacio (Cerema, 2014) avec un zoom sur la citadelle (rectangle noir) et une photo de la falaise. Les zones en mauve de la carte d'aléa sont celles à aléa très élevé et rouge celles à aléa élevé

3.2.1 Les conditions de réalisation des campagnes

Trois levés LiDAR ont été réalisés entre 2018 à 2019. Pour garantir une inter-comparaison précise, la position des stations de mesure a été marquée au sol lors de la 1ère campagne et a été relevée avec un récepteur GNSS. Outre la position, la hauteur du scanner, la résolution et la fréquence ont également été relevés de manière à réaliser les levés successifs selon le même mode opératoire.

Au total 11 stations (positions dégagées avec un angle de visée le plus frontal possible par rapport à la falaise de Bonifacio) ont été sélectionnées :

- six sont placées le long du trait de côte, pour le levé à longue portée (cf. Figure 8), en allant vers la pointe de Pertusato, à des distances allant de 500 à 1 500 m environ de la falaise (cf. Figure 8) ;
- cinq ont été positionnées dans les zones accessibles à pied, au niveau de la Citadelle sous la falaise (cf. Figure 8), pour les mesures à courte portée avec un champ de visée vertical plus étendu.



Figure 8 : localisation des 11 stations de mesure (en vert les stations pour le LiDAR à longue portée et en mauve celle pour le LiDAR à courte portée° (source Google Earth)

Les informations sur la prise de mesure et la densité de points sont données dans le Tableau 3.

Stations	Distance (m)	Fréquence (kHz)	Ouverture hor. (°)	Ouverture vert. (°)	Résolution angulaire (°)	Nombre de points	Densité de points /m²
1	1300	50 kHz	30	60	0,01	52 946 064	17
2	1600	30 kHz	40	60	0,006	5 963 645	31
3	200	50 kHz	40	60	0,01	43 223 892	714
4	90	150 kHz	65	60	0,01	186 356 642	3273
5	800	50 kHz	40	60	0,008	77 442 316	70
6	150	150 kHz	90	60	0,008	417 232 927	1624
7	150	97 Hz	360	300	0,009	884 181	505
8	80	97 Hz	360	300	0,009	1 057 644	1775
9	40	97 Hz	360	300	0,009	819 524	7100
10	75	97 Hz	360	300	0,009	1 403 996	2020
11	120	97 Hz	360	300	0,009	830 933	789

Tableau 3 : caractéristiques des nuages de points pour chaque station de mesure pour la première acquisition LiDAR (état zéro) avec les deux scans à longue (station de 1 à 6 en vert) et courte portée (en mauve)

La fréquence d'acquisition à longue portée a été définie en fonction de la réflectance de la roche, de la distance et de la météo. Pour 3 stations sur 6 une fréquence de 50 kHz a été choisie. Les stations restantes ont été levées avec une fréquence de 150 kHz et une seule station à 30 kHz.

La fréquence d'acquisition pour le LiDAR à courte portée est fixe à 97 Hz. Selon la fiche du constructeur (cf. annexe 2) on sait que cette fréquence permet d'assurer des acquisitions avec une surface réfléchissante à 90% à l'extérieur et à une portée de 330 m.

Il est à noter qu'ici l'ouverture horizontale du TLS à longue portée a été paramétrée pour avoir un bon recouvrement entre les nuages de points des différentes stations et en trouvant un bon compromis entre le temps d'acquisition et le résultat final à atteindre. L'ouverture verticale a été fixée à 60°, cette valeur assure un bon champ de vision à la verticale. La résolution angulaire pour le TLS à longue portée a des valeurs différentes selon les stations afin de pouvoir assurer une résolution spatiale entre 0,2 et 20 mm. Pour le TLS à courte portée le paramétrage est plus simple, car l'ouverture horizontale et verticale ainsi que la résolution angulaire sont fixes.



Figure 9 : en haut les nuages de points pour les 6 stations du LiDAR à longue portée. En bas le nuage de points de la station 2 a été enlevé pour permettre de mieux visualiser les nuages de points pour les autres stations. Le code de couleur est : turquoise pour la station 1, orange pour la station 2, violet pour la station 3, jaune pour la station 4, beige pour la station 5 et bleu foncé pour la station 6

On observe que le nombre de points et la densité de points des stations sont assez variables selon les stations. Ils dépendent clairement de l'ouverture horizontale, de la distance laser-cible et donc de la fréquence d'acquisition. Par exemple pour les stations 1 et 3, qui ont presque le même nombre de points et la même fréquence d'acquisition, on retrouve une densité de points plus importante pour la station plus proche de la cible (la station 3 à 200 m de distance). On a le même résultat pour la station 4 et 6. A parité de fréquence d'acquisition et d'ouverture horizontale la station la plus proche de la cible est celle qui aura une meilleure densité de points et donc un nuage plus précis en termes d'informations à exploiter.

Pour le TLS à longue portée, la densité maximale théorique est de 1 point tous les 2 cm à une distance de 1000 m dans des conditions météorologiques favorables et en présence de peu de végétation (Jaboyedoff et al., 2012). C'est le cas ici (Figure 9 et Tableau 3), bien que dans certains cas on a des densités de points moins importantes qu'attendues, comme à la station 5 à 800 m de distance. Cela s'explique par les conditions météorologiques, qui étaient très changeantes lors de l'acquisition, et /ou par les angles d'incidence de l'impulsion.

Pour le TLS à courte portée (cf. Tableau 3 station de 7 à 11), la densité est systématiquement plus élevée, car les acquisitions sont toujours faites proches de l'objet à numériser avec un paramétrage fixe (fréquence d'acquisition, ouverture horizontale, etc.).

La Figure 9 présente les nuages de points pour les 6 stations TLS à longue portée. Les Figure 10 et Figure 11 présentent les nuages de points nettoyés, assemblés et colorisés.



Figure 10 : vue en perspective du nuage de points relevé avec le scanner à longue portée



Figure 11 : vue de face du nuage de points relevé avec les deux scanners

Le Tableau 4 présente le nombre de points du nuage assemblé et nettoyé pour chaque campagne. On remarquera que le nuage de la dernière campagne est plus riche en points à la suite d'un affinage du paramétrage (la fréquence d'acquisition et la résolution angulaire ont été modifiées). Par ailleurs, en décembre 2018 une des stations n'a pu être réalisée ce qui peut expliquer la diminution de points entre l'état 0 et l'état 1.

Campagne	Etat	Nombre de points
Septembre 2018	0	761 880 040
Décembre 2018	1	642 483 881
Mai 2019	2	866 196 879

 Tableau 4 : nombre de points du nuage final, assemblé et nettoyé des points aberrants pour chaque campagne

Il est à noter aussi que pour les trois campagnes, les conditions météorologiques étaient moyennement favorables à la prise de mesure de qualité : peu de vent, mais plusieurs épisodes pluvieux, ainsi que des alternances entre ciel dégagé et ciel couvert avec de forts contrastes de luminosité. Ces conditions ont affecté la prise de mesures, car la réflectance de la surface n'est pas la même selon que ladite surface est sèche ou humide, ainsi que la prise de photos nécessaire à la colorisation des nuages de points, affectée par les contrastes de luminosité.

3.2.2 L'évolution du site par scan différentiel

Avec une précision centimétrique pour la citadelle et pluri-centimétrique autour de la citadelle (en cohérence avec les informations disponibles dans la littérature cf. Letortu et al., 2019 ; Francioni et al., 2018, etc.) les nuages de points étaient de qualité suffisante pour évaluer l'évolution du site entre deux campagnes de mesure.

La comparaison entre les états 0 et 1, dans la zone d'intérêt de la Citadelle, est présentée en Figure 12. Elle montre des écarts compris entre 0 m (en bleu) et 0,50 m maximum (en rouge), avec des écarts les plus importants observés :

- au niveau de la bande sableuse et des rochers qui affleurent au niveau de la mer. Cette évolution de la ligne de rivage peut s'expliquer par les courants marins et le vent, pouvant déplacer les dépôts de matériaux de petites dimensions en bordure de mer et pied de falaise;
- en bordure haute du bâti, et plus largement en bordure de nuage où peuvent persister, malgré le nettoyage, quelques points parasites. La densité de points est aussi localement plus faible ou plus hétérogène qu'au cœur de la zone cible, ce qui impacte la comparaison entre des scans successifs.

Au niveau de la fracture sub-verticale, sous la Place du Marché (Figure 12), les écarts entre les états 0 et 1 sont faibles, au plus de quelques centimètres. Les quelques secteurs pour lesquels ces écarts sont un peu plus importants sont principalement liés à la végétation.



Figure 12 : comparaison des nuages de points entre l'état 0 et l'état 1. L'écart maximum est de 0,50 m

Les scans différentiels réalisés jusqu'ici ont permis de confirmer l'absence d'évolution significative de la falaise en lien avec un champ de déformation local du front, notamment dans la zone de surplomb de la Place Manichella et de la Place du Marché.

3.2.3 Synthèse des opérations de traitement de données réalisées

Le logigramme présenté en Figure 13 synthétise toutes les opérations réalisées pour atteindre l'objectif de la mission. Certaines des opérations sont communes à celle déjà décrites pour le cas d'étude de la carrière en exploitation (cf. Figure 3).

Il est à noter qu'une fois les données acquises sur site et téléchargées sur un ordinateur, l'assemblage des stations a été effectué. Celui-ci a consisté à recaler dans un même référentiel puis à assembler les nuages de points obtenus pour chaque station de mesure puis à coloriser en RGB ces nuages à partir des photos acquises. Pour terminer, le nuage de points 3D a été nettoyé pour éliminer les points aberrants. Ce processus a conduit ici à éliminer environ 25% des points du nuage. Après ce traitement, les nuages de points des trois relevés ont pu être comparés entre eux (cf. Figure 13).

Les trois nuages de points ainsi que les résultats issus des comparaisons entre les scans 3D ont été mis à disposition des partenaires impliqués au côté de l'Ineris dans l'amélioration de connaissance de l'aléa mouvement de terrain du site, au travers du portail de web-monitoring e.cenaris (<u>https://cenaris.ineris.fr/</u>). Ce portail web dispose d'un accès sécurisé aux données avec des fonctionnalités d'affichage multiples, selon la nature des données. S'agissant des données LiDAR, un module de visualisation 3D permet la représentation interactive 3D depuis un poste utilisateur standard équipé d'un navigateur web.

Le nuage final de points a permis également d'élaborer un modèle géométrique haute résolution, puis un maillage de la falaise utilisé pour la modélisation numérique géomécanique 3D du site. Cette modélisation a été réalisée pour apporter des éléments permettant d'améliorer la qualification et la quantification de l'aléa « effondrement en grande masse » et pour mieux évaluer, dans un second temps, le niveau de risque en regard des enjeux de sécurité publique soulevés par le dit aléa.

Le processus de construction d'un modèle géométrique haute résolution et d'un maillage est décrit au paragraphe 3.3.

▷ Etude de conception
▷ Réalisation de la campagne
▷ Caractéristiques de la Campagne
abla Traitement et valorisation
Elaboration du nuage de points final
Extraction des données
Assemblage et colorisation des nuages de points du scan longue portée
Assemblage et colorisation des nuages de points du scan courte portée
Assemblage des 2 nuages de points correspondants aux deux scans
Nettoyage du nuage de points final
\rightarrow Suppression des points aberrants
ightarrow Suppression de la végétation en utilisant des filtres adaptés
Evaluation des indicateurs de qualité (précision, résolution, etc.)
Analyse de l'évolution du site
Comparaison du nuage de points avec les campagnes précédentes
Mise en évidence et caractérisation des écarts

Figure 13 : logigramme du traitement des données pour le suivi de l'évolution de la falaise. L'opération de colorisation des points peut ne pas être toujours possible, elle dépend fortement des conditions de luminosité qui peuvent rendre difficile la prise de photo

3.3 Les données LiDAR à grande échelle pour des calculs de stabilité

Le lac de Most en Tchéquie est un lac artificiel à 85 kilomètres au nord-ouest de Prague. Il s'agit d'une retenue d'eau d'un peu plus de 311 hectares et d'une profondeur de 75 m, dans la région du Massif central de Bohême. Il a été créé par l'ennoyage de l'ancienne mine de lignite à ciel ouvert éponyme dont l'exploitation s'est terminée en 1999.

Ce site fait l'objet, dans le cadre du projet Européen RAFF - Risk Assessment of final Pits during Flooding (RFCS, 2019-2021) dont l'Ineris est partenaire, d'une étude de stabilité à long terme. C'est dans ce contexte qu'un relevé LiDAR à longue portée a été réalisé. Il avait pour objectif de produire, à partir d'un nuage de points 3D haute résolution, un modèle numérique de terrain, puis un modèle géométrique et enfin un maillage du site.

La particularité ici était de coupler le levé LiDAR terrestre à un levé sonar pour reconstituer avec précision la géométrie complète du réservoir et de ses berges.

3.3.1 Numérisation du site

La campagne LiDAR (cf. Figure 14) a été réalisée en août 2019 dans des conditions météorologiques assez favorables.



Figure 14 : localisation du lac de Most et de ses dimensions et position des stations pour l'acquisition LiDAR à longue portée

Préalablement à la campagne, 8 stations ont été définies (cf. Figure 14). Leurs positions ont été marquées au moyen de repères de type clous de géomètres. La Figure 15 présente les nuages de points (avec différentes couleurs) et le nombre de points pour chaque station. Le nombre total de points après l'assemblage des 8 stations est de 1 832 667 130. Ce nombre élevé est dû au paramétrage, qui a été volontairement choisi assez fin pour pouvoir utiliser ce jeu de données pour une future comparaison de nuages de points une fois un nouveau levé réalisé.



Figure 15 : nuage de points final, après assemblage des 8 stations (environ 1,8 milliards de points). Le code couleur est : jaune pour le nuage de points de la station 1, rose pour le nuage de points de la station 2, bleu clair pour le nuage de points de la station 2bis, vert pour le nuage de points de la station 3, bleu pour le nuage de points de la station 4, gris pour le nuage de points de la station 5, mauve pour le nuage de points de la station 6 et orange pour le nuage de points de la station 7

Le Tableau 5 contient toutes	les informations sur	les stations.
------------------------------	----------------------	---------------

Tableau 5 : cara	actéristiques de	es nuages d	e points p	our chaque	station de	e mesure (à savoir le l	nombre
de point	s et la densité	de points pi	résentés s	ont avant la	a suppress	sion de la	végétation)	

Stations	Distance (m)	Fréquence	Ouverture	Ouverture	Résolution	Nombre de	Densité de
		(kHz)	hor.	vert.	angulaire	points	points /m²
			(°)	(°)	(°)		
1	800	50	60	60	0,0044	82 662 841	192
2	1100	150	80	60	0,0022	571 785 460	388
2bis	2300	150	85	60	0,0022	545 656 877	86
3	1500	50	43	60	0,0037	111 777 389	90
4	1000	50	72	60	0,0041	146 724 442	140
5	2300	30	30	60	0,0047	38 386 591	23
6	2200	50	60	60	0,0031	152 099 917	53
7	1500	50	65	60	0,0034	182 952 438	94

Comme pour les autres acquisitions la fréquence a été choisie en fonction de la réflectance de la roche, de la distance et de la météo. Pour 5 stations sur 8 une fréquence de 50 kHz a été définie. L'ouverture horizontale a été définie pour pouvoir assurer un bon recouvrement entre les différentes stations. L'ouverture verticale a été fixée à 60° pour les 8 stations. La résolution angulaire dans le plan horizontal et vertical a été choisie pour avoir une résolution spatiale d'environ 0,2 mm, de ce fait le nombre de points pour les stations est assez élevé.

La densité de points est plus importante pour les stations moins éloignées de la cible telles que les stations 1, 2 et 4. Cependant des différences peuvent exister pour des stations qui sont situées à une

distance équivalente comme par exemple les stations 2 et 4, qui ont respectivement une densité de 388 et 140 pts/m². Cette différence est due à la fréquence d'acquisition choisie (selon la météo et la réflectance de la roche), l'ouverture horizontale reste presque la même. Si on compare les deux stations à 2300 m de distance (les stations 2bis et 5), la densité de points plus importante est celle de la station 2bis ayant une fréquence et une ouverture horizontale plus grandes.

A retenir qu'en raison du nombre de stations élevé et de leur ouverture horizontale la durée d'acquisition sur site a été relativement longue (presque 5 jours). Le choix du nombre de stations et de leur ouverture horizontale est lié à l'extension de la zone à numériser.

Etant donné la présence de végétation abondante, l'élaboration du nuage final de points a nécessité un post-traitement qui a consisté à appliquer un filtre pour enlever la végétation (cf. Figure 16).



Figure 16 : nuage de points avant (image de gauche) et après (image de droite) le filtrage de la végétation au sol

Ce filtre fonctionne de manière hiérarchique avec plusieurs niveaux de détail en utilisant une approche grossière à fine. Pendant le processing du filtre la distance des points de la surface du sol estimée est calculée. Sur la base de cette distance les points sont classifiés comme « sol » ou « hors sol ». Le filtre ne fonctionne pas s'il y a des surplombs.

3.3.2 Construction d'un maillage géométrique à partir d'un nuage de points

Le nuage de points final a ensuite été utilisé pour la réalisation du maillage volumique du site (modèle géométrique précis) pour construire le modèle numérique 3D.

La première étape a consisté à sous échantillonner drastiquement l'ensemble du nuage de départ en priorisant les zones plus denses et en préservant les zones moins denses tout en respectant la géomorphologie initiale du site. Cette étape a permis de diminuer le nuage de points initial de 1,83 milliards de points à 36 845 points (Figure 17 en haut) autorisant une manipulation plus rapide et plus fluide des données dans les logiciels de modélisation. Cela n'impacte pas la précision des résultats, car le nombre de points retenu est cohérent avec la finesse du maillage souhaité. Le choix effectué a permis un bon compromis entre précision des résultats et temps de calcul. Les données bathymétriques (relief sous-marin.) ont ensuite été agrégées aux points aériens en veillant à minimiser les erreurs entre ces 2 nuages de points.

La deuxième étape a consisté à générer un modèle géométrique précis. La procédure choisie a consisté d'abord à la création d'un maillage surfacique par interpolation surfacique (de type MNT cf. Figure 17 en bas) sur le nuage de points global et ensuite d'un maillage volumique (avec une maille de 5 m dans la zone d'intérêt et des mailles de 50 m au bord du modèle) représentatif du site. Cette opération n'est pas réalisée avec les logiciels de traitement des données LiDAR. Différents logiciels et méthodes existent pour arriver au résultat, c'est le modélisateur qui fait le choix selon les outils à sa disposition.

Le maillage volumique (Figure 18) obtenu dans cette étude correspond à 7 926 320 zones (dont 94,2% d'hexaèdres) et 5 589 936 nœuds. Ce maillage a ensuite été importé dans le logiciel de modélisation pour la réalisation d'analyses de stabilité.



Figure 17 : en haut le nuage de points « dégradé » avec 36 845 points et la bathymétrie (obtenue par un partenaire tchèque du projet RAFF) et en bas le maillage surfacique initial



Figure 18 : maillage volumique

3.3.3 Synthèse de opérations de traitement de données

Les différentes étapes réalisées pour cette campagne LiDAR sont décrites dans le logigramme en Figure 19.

La partie qui distingue ce logigramme des deux précédents est l'étape « valorisation ». Pour pouvoir exploiter les données LiDAR, qui sont assez volumineuses, dans les logiciels de modélisation un souséchantillonnage du nuage de points final est réalisé. Après avoir réduit de manière homogène le nombre de points, le nuage « dégradé » peut être manipulé d'abord pour réaliser un modèle géométrique précis puis pour construire le modèle numérique 3D. Les experts en charge de la modélisation pilotent la création de ce modèle géométrique en se basant sur la connaissance des méthodes disponibles et des performances de leurs logiciels de calculs, tout en essayant de réaliser des modèles qui soient les plus précis possible afin que les résultats de la modélisation soient assez proches de la réalité.

▷ Etude de conception	
▷ Réalisation de la campagne	
Caractéristiques de la Campagne	
abla Traitement et valorisation	
Elaboration du nuage de points final	
Extraction des données de la campagne	
Assemblage des nuages de points à l'aide des logiciels adéquats	
Nettoyage du nuage de points final	
ightarrow Suppression des points aberrants	
→ Suppression de la végétation en utilisant des filtres adaptés	
Evaluation des indicateurs de qualité (précision, résolution, etc.)	
Elaboration d'un MNT	
Création d'un nuage de points sous-échantillonné	
Création du nuage de points sonar à partir des sommets du maillage fourni par un partenaire	extérieur
Assemblage avec le levé sonar (mise en cohérence des 2 repères géographiques)	
Création du MNT	
Création d'un modèle géométrique précis	
Création du maillage	
Modélisation réomécanique 3D	

Figure 19 : logigramme des opérations pour la campagne TLS à longue portée dans le cadre du projet RAFF

4 Bilan et perspectives

L'utilisation de la technologie LiDAR pour l'étude des risques d'instabilité rocheuse est prometteuse. Elle permet de compléter et dans certains cas de remplacer la surveillance géotechnique traditionnelle pour la gestion du risque d'instabilité de pente ou fronts rocheux. Chaque campagne est différente et un travail de préparation minutieux est nécessaire avant l'acquisition des données sur site. En effet, il est important de bien connaître la finalité des mesures et de bien analyser la configuration du site de manière à obtenir des données de bonne qualité qui soient exploitables dans le cadre de l'étude envisagée.

Les contextes d'intervention aussi peuvent être assez différents, comme vu à travers de quelques exemples, et les conditions d'accessibilité et de mise en œuvre très variables. Cependant, le déroulé d'une campagne LiDAR terrestre reste toujours le même, il se décompose, comme illustré en Figure 20, entre le travail préparatoire (étude de conception de la campagne), la prise de mesure *in situ* (réalisation de la campagne) et l'exploitation des données (traitement des données et valorisation).

Si la phase de préparation n'est pas bien accomplie elle peut avoir des conséquences sur les autres phases, par exemple augmenter la durée de la campagne sur site ou impacter la qualité des données. Il est indispensable de bien étudier préalablement la zone d'étude (vérifier les accès, la végétation, la topographie, etc.). A partir de ce repérage et selon les dimensions de la zone d'étude, le nombre et la position des stations de mesure pourront être définis. Il faut souligner que la manière dont les données seront assemblées conditionne la position des stations et de ce fait l'approche pour scanner l'objet d'étude. Ensuite, en fonction du nombre de stations et du paramétrage envisagé pour le scanner, une durée approximative de mesures *in situ* peut être estimée. Cette durée prévue peut néanmoins varier une fois sur le terrain à cause d'autres facteurs, tels que par exemple une météo peu favorable.

Certains types de scanner permettent de faire un scan « rapide » (moins riche en points) de la zone d'étude avant de démarrer l'acquisition des données. Ce scan rapide permet ensuite de délimiter la zone à imager en zoomant directement sur l'écran du scanner, et d'ajuster les paramètres d'acquisition des données en fonction des conditions locales.

abla Etude de conception

- Reconnaissance cartographique de la zone d'étude
 - o Identification des accès et topographie
 - Analyse environnementale (relief, géologie etc.)
- > Définition des stations et pré-configuration des paramètres d'acquisition
- > Identification du matériel nécessaire pour la mission (disque dur, PC, batteries, canne GPS, etc.)

abla Réalisation de la Campagne

- > Vérification du positionnement des stations et des accès
- Réalisation d'un scan rapide
- Ajustement des paramètres d'acquisition prédéfinis
- Prise de photos si possible
- > Géoréférencement et marquage de la station si nécessaire

▷ Traitement et valorisation propres à chaque Campagne



Le travail d'exploitation des données est fonction des traitements à réaliser et des aléas qui ont pu être rencontrés sur site, comme une météorologie défavorable, ou des problèmes techniques non prévus. En effet, comme illustré au travers des trois cas d'application, il est possible que le nuage de points ne soit pas parfait et que son exploitation nécessite un nettoyage pour éliminer les points aberrants ou retirer certaines données, liées par exemple à la présence de végétation. Ces étapes de traitement peuvent en apparence sembler faciles, surtout qu'il existe de nombreux logiciels de traitement de données sur le marché, mais les données sont souvent volumineuses et complexes à manipuler.

Les nuages de points sont en général géoréférencés et peuvent enfin être exploités dans de nombreux logiciels afin de faire différents types de calculs plus ou moins poussés. Par exemple, les relevés de TLS périodiques (comme ceux réalisés à Bonifacio) permettent de faire des calculs de déplacement et de se faire une idée de l'évolution des instabilités du site (chutes de blocs, fractures, etc.), lorsque l'accès pour la réalisation d'inspections visuelles ou géotechniques est difficile. Par ailleurs, si le versant en étude présente des failles et autres fractures et/ou des discontinuités le TLS à longue portée permet d'obtenir leurs orientations à distance (cf. Figure 21) et de caractériser les compartiments rocheux.

L'application la plus courante reste la réalisation de MNT à partir de nuages de points qui est à la base de la cartographie. Ces MNT peuvent être réalisés de façon différente et via un large éventail de logiciels et peuvent ensuite être utilisés dans des logiciels de type SIG. Le MNT constitue une base pour la réalisation de cartes de pente, de calculs de volumes du minerai excavé (avec la soustraction de deux MNT obtenus par données LiDAR à différentes périodes), de cartes d'aléas, de susceptibilité, etc. La géologie et/ou l'état de fracturation d'un site est également une information qui peut être obtenue via les données LiDAR et qui peut être précisée en la couplant à des inspections visuelles, si l'objet est accessible. La géologie ou les fractures seront alors disponibles sur le MNT obtenu.

Dans le cadre de la surveillance, il est désormais possible (si le site le permet) de mettre en place une surveillance en temps réel de l'instabilité via le scanner laser, qui sera piloté à distance, et des logiciels dédiés.

Pour améliorer un suivi périodique à long terme d'une instabilité de pente, comme celle d'une falaise rocheuse, on peut identifier sur la falaise un secteur à surveiller davantage, et via l'installation de cibles délimitant ce secteur, on peut arriver à quantifier l'impact de l'érosion marine de manière précise.



Figure 21 : exemple d'identification des discontinuités à partir des données de LT (source projet SLOPES)

Ce rapport n'illustre qu'une partie des potentialités du TLS et qu'une petite fraction des fonctionnalités de traitement de données et de calculs possibles à partir de nuages de points 3D denses.

Nos futurs travaux se porteront sur l'utilisation de post-traitements plus poussés qui permettraient d'améliorer la précision des données ainsi que la mise en œuvre de filtres permettant un post-traitement plus rapide.

5 Conclusions

L'Ineris s'intéresse depuis plusieurs années aux technologies de télédétection optique qui présentent de nombreux atouts pour la prévention et la gestion du risque d'instabilités de versants et fronts rocheux.

Ce rapport rassemble des éléments méthodologiques sur l'utilisation d'un scanner terrestre à longue portée en termes de déployabilité, performances, conditions et limites d'utilisation. Il illustre de manière didactique les paramètres clés de la prise de mesure dans trois contextes différents.

En premier lieu, intervient la nécessité de bien préparer les campagnes de mesures en laboratoire, en amont de la campagne *in situ*, ceci afin de bien définir et positionner les stations de mesures. Les objets à numériser sont souvent de grandes dimensions et les conditions d'accessibilité, la topographie, ou encore la présence de végétation nécessitent de bien anticiper les éventuels effets de masques. La qualité du recouvrement entre deux stations impacte clairement la précision du nuage de points, et le géoréférencement des stations est indispensable notamment pour évaluer l'évolution d'un site par scan différentiel. Ce rapport présente également l'intérêt de coupler les levés avec différents appareils (sonar, TLS à courte et longue portée) pour imager un objet géologique dans sa globalité avec la meilleure précision possible.

Un aperçu de l'utilisation de nuages de points 3D denses pour la modélisation numérique géomécanique 3D avancée est présenté. Cette étude montre que la construction d'un modèle géométrique, puis d'un maillage 3D, à partir d'un nuage de points est un gain significatif pour prendre en compte la géométrie complexe des objets géologiques et ainsi améliorer la précision des modèles et de leurs résultats. Elle nécessite toutefois des compétences et des outils pointus.

De même, si le traitement de nuage de points semble en apparence facile les données sont souvent volumineuses et complexes à manipuler. Le suivi dans le temps d'un site, par scan différentiels par exemple, nécessite un géoréférencement précis. La complexité des traitements à appliquer pour obtenir un nuage le plus représentatif, dépend également beaucoup des propriétés de la couverture rocheuse

(réflectance, humidité, etc.), des interférences avec des constructions ou des infrastructures existantes, de la végétation éventuelle, ainsi que des conditions atmosphériques lors du levé LiDAR.

Les travaux de l'Ineris se poursuivent sur l'exploitation du LiDAR à des fins de surveillance en investiguant les modalités à mettre en œuvre, les précautions et les limites de la surveillance continue d'un site par technologie LiDAR. L'apport des paramètres physiques des surfaces imagées (couleur, rugosité, réflectivité, etc.) acquis lors d'un scan pour l'aide au diagnostic de stabilité de géostructures notamment en appui aux inspections visuelles destinées à caractériser l'état de fracturation est également examiné.

6 Remerciements

Les cas d'étude présentés dans ce rapport ont pu l'être grâce à l'accès facilité à des sites d'intérêt associé à la mise à disposition libre de données collectées, à savoir :

- le site des Carrières de Voutré ;
- le site de Bonifacio, en Corse du Sud,
- le site du lac de Most, en république tchèque

Nous souhaitons, pour cela, vivement remercier M. Guillaume ALEXANDRE (Directeur Technique – Société des Carrières de Voutré), les collègues du groupement BRGM-Cerema-Ineris et de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer, ainsi que l'ensemble des partenaires du projet européen RFCS-RAFF.

7 Références

Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P. (2007). Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. Nat Hazards Earth Syst Sci 7:637–650. doi:10.5194/nhess-7-637-2007.

Biasion A., Walsh G., Walser B. and Moerwald T. (2019). A new approach to the terrestrial laser scanner workflow: the RTC360. FIG Working Week 2019. Hanoi, Vietnam, April 22-26, 2019.

Besl P., McKay N. (1992). A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 14:239–256. doi:10.1109/34.121791.

Brideau M.A., Stead D. (2010). Controls on block toppling using a three-dimensional distinct element approach. In Rock Mech Rock Eng 43:241–260.

Brideau M.A., Pedrazzini A., Stead D., Froese C., Jaboyedoff M., van Zeyl D. (2011). Three-dimensional slope stability analysis of South Peak, Crowsnest Pass, Alberta, Canada. In Landslide 8:139–158.

Bonifacio – Falaise de Sutta Rocca. Etude de l'aléa chutes de blocs, version de juillet 2014, Cerema. juillet 2014.

Bonifacio – secteur de la Citadelle. Addendum au rapport de juillet 2014. Cerema- novembre 2014.

Bosq H., Klein E., (2013). Méthodes terrestres de surveillance en grand des instabilités de versants : revue des technologies RADAR et LIDAR du marché. Rapport Ineris.

Carter W., Shrestha R., Tuell D., Bloomquist D., Sartori M. (2001). Airborne laser swath mapping shines new light on earth's topography. In Eos, Trans, Am Geophys Union 82(46):549, 550, 555.

Chen Y., Medioni G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. Image Vis Comput 10:145–155. doi:10.1016/0262-8856(92)90066-C.

Collins B.D., Sitar N. (2008). In Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. Geomorphology 97, 483–501.

Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). Landslides investigation and mitigation, transportation research board. In Turner AK, Schuster RL (eds) Landslide types and process, National Research Council, National Academy Press, Special Report 247:36–75.

Derron M.H., Jaboyedoff M. (2010). Preface to the special issue. In: LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization. In Nat Hazards Earth Syst Sci 10:1877–1879.

Dewez T.J.B., Rohmer J., Regard V., and Cnudde C. (2013). Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val (Normandy, northern France. In J. Coast. Res., Sp. Iss. 65, DOI:10.2112/SI65-119.

Duong H. (2006). Full waveform analysis: Icesat laser data for land cover classification. In: ISPRS commission VII mid-term symposium "remote sensing: from pixels to processes", pp 30–35.

Francioni M., Coggan J., Eyre M., Stead D. (2018). A combined field/remote sensing approach for characterizing landslide risk in coastal areas. In Int J Appl Earth Obs Geoinformation 67, 79–95.

Francioni M., Salvini R., Stead D., Giovannini R., Riccucci S., Vanneschi C., Gulli D. (2015). An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: slope stability assessment through kinematic and numerical methods. Comput Geotech 67:46–63.

Francioni M., Salvini R., Stead D., Litrico S. (2014). A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area, Italy. In Eng Geol 183:290–302.

Gulyaev S.A., Buckeridge J.S. (2004). Terrestrial methods for monitoring cliff erosion in an urban environment. In J. Coast Res. 20 (3), 871–878.

Harding D (2008) Pulsed laser altimeter ranging techniques and implications for terrain mapping, Chap 5. In: Shan J, Toth CK (eds) Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC Press, Taylor & Francis, pp 173–194

Haugerud R.A., Harding D.J., Johnson S.Y., Harless J.L., Weaver C.S., Sherrod B.L. (2003). High-resolution lidar topography of the Puget Lowland, Washington—A Bonanza for earth science. In GSA Today 13:4–10.

Heritage G.L., Large A.R.G. (2009) Laser scanning for the environmental sciences. Wiley-Blackwell, London.

Hiremagalur J., Yen K.S., Akin K., Bui T., Lasky T.A., Ravani B. (2007). Creating standards and specifications for the use of laser scanning in CalTrans projects. Technical report no F/CA/RI/2006/46, California Department of Transportation, US (www.ahmct.ucdavis.edu/images/AHMCT LidarFinalReport.pdf).

Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M.H., Loye ´A., Metzger R. and Pedrazzini A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. In Nat. Hazards, Springer Netherland, 61, 5–28, doi:10.1007/s11069-010-9634-22012a.

Jaboyedoff M., Pedrazzini A., Horton P., Loye A., Surace I. (2008a). Preliminary slope mass movements susceptibility mapping using LIDAR DEM. In: Proceedings of 61th Canadian geotechnical conference, pp 419–426.

Kamerman G.W. (1993). Laser radar (chapter 1). In Fox CS (ed) The infrared and electro-optical systems handbook. Infrared information analysis center. Ann Arbor, Michigan, pp 1–76.

Lague D., Brodu N., Leroux J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to Rangitikei canyon (NZ). In ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens. 82, 10–26.

Letortu P., Costa S., Maquaire O., Davidson R. (2019). Marine and subaerial controls of coastal chalk cliff erosion in Normandy (France) based on a 7-year laser scanner monitoring. In *Geomorphology*, Elsevier, 335, pp.76-91. <u>(10.1016/j.geomorph.2019.03.005)</u>. <u>(hal-02051396)</u>.

Letortu P., Costa P., Maquaire O., Delacourt C., Augereau E., Davidson R., Suanez S., Nabucet J. (2015). Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: the contribution of terrestrial laser scanning. In Geomorphology 245, 3–14.

Lichti D.D., Jamtsho S. (2006). Angular resolution of terrestrial laser scanners. In Photogramm Rec 21:141–160.doi:10.1111/j.1477-9730.2006.00367.

Lim M., Rosser, N.J. Allison, R.J., Petley D.N. (2010). Erosional processes in the hard rock cliffs at Staithes, North Yorkshire. In Geomorphology 114, 12–21.

Lim M., Petley, D.N. Rosser, N.J. Allison, R.J. Long, A.J. Pybus, D. (2005). Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. In Photogramm. Rec. 20, 109–129.

Luo Z.Q., Liu X.M., Zhang B., Lu H., Li C. (2008). Cavity 3D modeling and correlative techniques based on cavity monitoring. In J. Cent. South Univ. Technol. 15: 639–644 DOI: 10.1007/s11771–008–0119–3.

Manetti L., Steinmann G. (2007). 3DeMoN ROBOVEC-integration of a new measuring instrument in an existing generic remote monitoring platform. In: 7th international symposium on field measurements in geomechanics, September 2007, Boston, MA, USA, pp 24–27.

Martino S., Mazzanti P. (2014). Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the Mt. Pucci case study (Italy). In Nat Hazards Earth Syst Sci 14:831–848. https://doi.org/10.5194/nhess-14-831-2014.

Petrie G., Toth C.K. (2008). I. Introduction to laser ranging, profiling and scanning, II. Airbone and spaceborne laser profiles and scanners, III. Terrestrial laser scanners (chapters 1 to 3). In: Shan J, Toth CK (eds) Topographic laser ranging and scanning: principles and processing, CRC Press, Taylor & Francis.

Rosser N.J., Brain M.J., Petley D.N., Lim M., Norman E.C. (2013). Coastline retreat via progressive failure of rocky coastal cliffs. In Geology 41 (8), 939–942.

Rosser N.J., Lim M., Petley D.N., Dunning,S.A. Allison, R.J. (2007). Patterns of precursory rock fall prior to slope failure. In J. Geophys. Res.: Earth Surface 112. F04014.

Rosser N.J., Petley D.N., Lim M., Dunning S.A., Allison R.J. (2005). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. In Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 38, 363–375.

Salvini R., Francioni M., Riccucci S., Bonciani F., Callegari I. (2013). Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola-Iselle railway, the Italian Alps. In Geomorphology 185:110–122.

Salvini R., Francioni M., Fantozzi P.L., Riccucci S., Bonciani F, Mancini S. (2011). Stability analysis of "Grotta delle Felci" Cliff (Capri Island, Italy): structural, engineering–geological, photogrammetric surveys and laser scanning. In Bull Eng Geol Environ. 70:549–557.

Slob S., Hack R. (2004). 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique. In Engineering geology for infrastructure planning in Europe: a European perspective, Lectures Notes. In Earth Sciences, Springer, Berlin/Heidelberg, 104:179–189.

Slob S., Hack H., Turner A.K. (2002). An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. In Dinid da Gama C, Riberia e Sousa L (eds) Proceedings of ISRM EUROCK 2002, 25–28 November 2002, Funchal, Portugal, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp 87–94.

Spreafico M.C., Cervi F., Francioni M., Stead D., Borgatti L. (2017). An investigation into the development of toppling at the edge of fractured rock plateaux using a numerical modelling approach. In Geomorphology 288:83–98.

Spreafico M.C., Francioni M., Cervi F., Stead D., Bitelli G., Ghirotti M., Girelli V.A., Lucente C.C., Tini M.A., Borgatti L. (2016). Back analysis of the 2014 San Leo landslide using combined terrestrial laser scanning and 3D distinct element modelling. In Rock Mech Rock Eng 49:2235–2251.

Stead D., Wolter A. (2015). A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology. In J Struct Geol 74:1–23.

Stead D., Coggan J. (2012). Numerical modelling of rock slope stability. In Clague J, Stead D (eds) Landslide: types, mechanisms and modelling. Cambridge University Press, Cambridge, pp 144–158.

Vanneschi C., Eyre M., Francioni M. and Coggan J. (2017). The Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring and Characterization of Slope Instability". In Procedia Engineering, vol.191, pp.150 – 157.

Westoby M.J., Lim M., Hogg M., Pound M.J, Dunlop L., Woodward J. (2018). Cost-effective erosion monitoring of coastal cliffs. In Coastal Engineering 138, 152–164.

8 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : fiche technique scanner Riegl
- Annexe 2 : fiche technique scanner Faro
- Annexe 3 : logiciels utilisés

Annexe 1 Fiche technique scanner Riegl

3D Very Long Range Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing

- very long range up to 4,000 m
- eye safe operation at Laser Class 1
- wide field of view, 60° x 360°
- high speed data acquisition up to 222,000 meas. / second
- high accuracy, high precision ranging based on echo digitization and online waveform processing
- multiple target capability unlimited number of targets
- optional waveform data output
- built-in calibrated digital camera
- on-board inclination sensors
- integrated L1 GPS receiver with antenna
- integrated compass
- built-in SSD drive storage
- compact and rugged design
- advanced camera options

This 3D VZ-Line Laser Scanner offers superior and unrivaled long range measurement performance up to 4,000 m reflectorless while still maintaining completely eye safe operation (Laser Class 1).

RIEGL's unique V-Line technology is based on echo digitization and online waveform processing and is the key to enabling such extreme long range measurements. The VZ-4000 operates even in poor visibility and demanding multi target situations caused by dust, haze, rain, snow, etc. which are frequently found in difficult environments such as mining sites.

Modes of Operation:

- stand-alone operation with integrated graphical user interface via 7" touchscreen
- remote control VNC Viewer with any standard tablet PC or mobile device via WiFi
- remote operation with RiSCAN PRO on a notebook via LAN or WiFi connection
- customized operation by third party tools / applications based on *RIEGL's* well documented interfaces and scanner libraries (e.g., RiVLib).

Typical applications include

- Topography & Mining
- Long Range Monitoring
- Civil Engineering
- Archaeology



visit our website www.riegl.com

Terrestrial Laser Scanning

VZ®-4000 Key Features and Components



Extremely Long Range Performance

The High-Speed, High-Resolution 3D Laser Scanner *RIEGL* VZ-4000 offers an extremely long range of more than 4,000 m and a wide field of view of 60° vertical and 360° horizontal. It uses an invisible laser beam for eye safe operation in Laser Class 1,

The high accuracy and reliability of range measurement performance is based on *RIEGL's* unique V-Line technology of echo digitization and online waveform processing. Extreme long range measurements can be achieved even with poor visibility and demanding multi target situations caused by dust, haze, rain, snow, etc.

Built-in Camera

A built-in calibrated 5-Megapixel camera capturing images deflected by the laser mirror enables coverage of the entire field of view with an appropriate number of high resolution images automatically stitched together to create a high resolution panorama image. This panorama image, in combination with precise 3D measurements produced by the VZ-4000, enables the creation of photorealistic virtual models for geological and geotechnical investigations, avalanche research, geomorphology, and other geological features.

Waveform Data Output Option

The digitized echo signals, also known as waveform data, acquired by the *RIEGL* VZ-4000 are the basis for waveform analysis. This data is provided via the optionally available waveform data output and accessible with the associated *RIEGL* software library RiWAVELib for investigations and research on multi target situations based on the digital waveform data samples of the target echoes.

Compatible Software Packages

The *RIEGL* VZ-4000 is compatible with the *RIEGL* software package RiSCAN PRO for terrestrial laser scanning, *RIEGL*'s interface library RiVLib, as well as the workflow-optimizing software packages, e.g., RiMINING. The optional software plugin RiMTA TLS provides automatic assignment of the scan data to the correct MTA zone in multiple time around situations.

Supported Registration Methods

Direct Geo-Referencing

- integrated GPS receiver (L1) connected
- external high-end RTK GNSS receiver connected
- integrated compass, accuracy typically 1° (one sigma value, available for vertical scanner setup position)
- on-board inclination sensors (tilt range $\pm 10^{\circ}$, accuracy typ. $\pm 0.008^{\circ}$)

GNSS Traversing

- GNSS position (RTK or autonomous)
- on-board inclination sensors
- automatic acquisition of well known remote target (reflector)

Free Stationing

 fast fine scanning of reflectors for precise determination of scanner position using control points

Backsighting

- setup on well known point
- on-board inclination sensors
- precise fine scanning of well known remote target (reflector)



Operating Elements and Connectors RIEGL VZ®-4000



standard clear atmosphere: visibility 23 km

MTA 2

MTA 1

work,

plaster narble

65 70 75 80 85

white

90

- clear atmosphere: visibility 15 km
- light haze: visibility 8 km
 - medium haze: visibility 5 km



30 kHz PRR





300 kHz PRR



The following conditions are assumed:

- flat target larger than footprint of the laser beam
- perpendicular angle of incidence
- average brightness
- ambiguity resolved by post processing with RiMTA TLS

MTA zones:

MTA 1: no ambiguity / 1 pulse "in the air" MTA 2: 2 pulses "in the air" MTA 3: 3 pulses "in the air" MTA 4: 4 pulses "in the air"

User Friendly Operation

User-Friendly and Efficient Operation and Acquisition Workflow

Operation is easy with the integrated graphical user interface via 7" touchscreen, or by remote control of the scanner via VNC Viewer with any tablet PC or mobile device via WiFi connection.

Highly efficient scan data acquisition and global registration is supported by on-board inclination sensors, integrated L1 GPS receiver, an interface



for a high-end external GNSS receiver on top of the scanner, a digital compass and built-in SSD data storage media. With a visual project overview of acquired scan data, it is possible to ensure complete data coverage or check the progress of a project as it is acquired. The system provides a number of useful features that help to increase the overall user experience. One of these features is the ability to schedule scans to be acquired fully automatically on a regularly defined time interval which is useful for capturing 4D

(3D time-lapse) datasets without direct user supervision of the system.

Power Supply

- intelligent power supply management, up to three independent external power sources can be connected simultaneously for uninterrupted operation
- reliable under- and over voltage protection
- wide external voltage supply range 11-32 V DC
- power consumption typ. 75 W (max. 90 W)
- LED indicators for power status

Camera Capabilities

Advanced Camera Support Capability

The VZ-Line of scanners has been updated with advanced camera support capability. Utilizing a specialized interface and a universal mount system, *RIEGL* is able to provide support for a wide variety of industrial cameras in standalone operation. This development enables the VZ-4000 to **directly control**, **operate and acquire images from RGB**, **Thermal**, **Industrial and a number of other camera systems and types** without complex cabling, connections or the need of an external laptop. With simplified mount integrations, it is now possible to acquire advanced images from state-of-the-art camera technologies simply using *RIEGL* Terrestrial Laser Scanners.

Laser Product Classification	Class 1 Laser Product according to IEC 60825-1:2014				
Range Measurement Performance ¹⁾ Measuring Principle	time of flight measurement, echo signal digitization, online full waveform analysis, multiple-time-around processing, full waveform export capability (optional)				
Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) ²⁾	30 kHz	50 kHz	150 kHz	300 kHz	
Effective Measurement Rate (meas./sec) ²⁾ Max, Measurement Range ³⁾ natural targets $\rho \ge 90 \%$	23,000 4,000 m	37,000 4,000 m ⁴⁾	113,000 2,700 m ⁴⁾	222,000 2,000 m ⁴⁾	
natural targets $\rho \ge 20\%$	2,300 m	2,300 m ⁻⁴⁾	1,450 m ⁻⁴⁾	1,000 m 4)	
		placilically	uniimied *		
Accuracy ^() 8) Precision ^{7) 8)} Minimum Range Laser Wavelength Laser Beam Divergence ⁹⁾ Laser Beam Footprint (Gaussian Beam Definition)	15 mm 10 mm 5 m near infrared 0,15 mrad 18 mm @ exit, 7	'5 mm @ 500 m, 1	50 mm @ 1000	m, 300 mm @ 2000 m	
 With online waveform processing. Rounded values, selectable by measurement program. Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter, perpendicular angle of incidence and for atmos- pheric visibility of 23 km. In bright sunlight, the max, range is shorter than under overcast sky. Ambiguity to be resolved by post-processing with RIMTA TLS 	 If the laser beam hits, in part, more than one target, the laser's pulse power is split accordingly. The date values, selectable by measurement program, and values for average conditions. Maximum range is reduced. Details on request. Accuracy is the dagree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. Accuracy is the dagree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. Accuracy is the dagree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. Accuracy is the dagree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value. Precision, also called reproducibility or repeatability, is the degree to which further measurement the same result. One sigma @ 150 m range under <i>RIEGL</i> test conditions. Measured at the 1/e² points, 0.15 mrad corresponds to an increase of 15 mm of beam diameter 100 m of range. 				
Scanner Performance Scanning Mechanism	chanism Vertical (Line) Scan Horizontal (Frame Ightweight mirror rotating head			Horizontal (Frame) Scan rotating head	
Field of View (selectable) Scan Speed (selectable) Angular Step Width Δ ϑ (vertical), Δ ϕ (horizontal)	total 60° (+30° / -30°) max. 360° 100°/sec to 14400°/sec (+ 20 rotations/sec), full FOV 0°/sec to 60°/sec ¹⁰ 0.002° $\leq \Delta \theta \leq 0.280^{\circ 11}$ 0.002° $\leq \Delta \phi \leq 3^{\circ 11}$				
Angle Measurement Resolution Inclination Sensors GPS Receiver	between consecutiv better than 0.00 integrated, for v integrated, L1, w	e laser snors 105° (1.8 arcsec) ertical scanner setu ith antenna	up position, detai	between consecutive scan lines better than 0.0005° (1.8 arcse ils see page 2	
Compass Laser Plummet	integrated, for vi integrated	ertical scanner setu	up position, detai	ils see page 2	
Internal Sync Timer Scan Sync (optional) Waveform Data Quitnut (optional)	integrated, for real-time synchronized time stamping of scan data scanner rotation synchronization providing digitized echo signal information for specific target echoes				
10) Frame scan can be disabled, providing 2D scanner operation.	11) Selectable.				
General Technical Data Power Supply Input Voltage / Power Consumption External Power Supply Main Dimensions / Weight Humidity / Protection Class	11 - 32 V DC / ty up to 3 indepen simultaneously f 248 x 226 x 450 max. 80 % non	p, 75 W (max, 90 W Ident external powe or uninterrupted op mm (length x width x h condensing @ +31) er sources can b beration eight), approx. 14 °C / IP64, dust-p	pe connected 1.5 kg proof and splash-proof	
Temperature Range Storage / Operation Low Temperature Operation ¹²⁾	-10°C up to +50°C / 0°C up to +40°C (standard operation) -20°C: continuous scanning operation if instrument is powered on while internal temperature is at or above 0°C and still air				
Integrated Digital Camera	field of view 7.2° resolution 2560 ;	x5.5° (v x h) x 1920 pixels (5 Mpi	xel)		
Display	7" WVGA (800 x capacitive touc	480) color hscreen, full opera	tion control for s	stand alone usage	
	12) Insulating the scar	nner with appropriate mate	ria l will enable operat	ion at even lower temperatures.	



RIEGL Laser Measurement Systems GmbH Riedenburgstraße 48 3580 Horn, Austria Phone: +43 2982 4211 | Fax: +43 2982 4210 office@riegl.co,at www.riegl.com

RIEGL USA Inc. Orlando, Florida | info@rieglusa.com | www.rieglusa.com **RIEGL Japan Ltd.** Tokyo, Japan | info@riegl-japan.co.jp | www.riegl-japan.co.jp RIEGL China Ltd. Beijing, China | info@riegl.cn | www.riegl.cn



Data Sheet, *RIEGL* VZ-4000, 2017-06-07

Copyright *REGL* Laser Measurement Systems GmbH © 2017– All rights reserved. Use of this data sheet other than for personal purposes requires *RIEGL's* written consent. This data sheet is compiled with care. However, errors cannot be fully excluded and alternations might be necessary.

Annexe 2 Fiche technique scanner Faro

FARO[®] Laser Scanner Focus^{3D} X 330 L'appareil idéal pour la documentation 3D et le relevé topographique





Longue portée - 330 m

Le Focus^{3D} X 330 peut numériser des objets jusqu'à 330 m de distance. Il est ainsi plus rapide d'effectuer le relevé 3D de grands bâtiments, d'excavations ou d'objets difficiles d'accès en faisant moins de numérisations.

Positionnement aisé - récepteur GPS intégré

Avec son récepteur GPS intégré, le scanner laser est capable de mettre en corrélation des numérisations individuelles lors du post-traitement, ce qui le rend idéal pour les applications de relevé 3D.

Numérisation en extérieur - en plein soleil

Le Focus^{3D} X 330 peut effectuer rapidement des numérisations très précises même en cas de fort ensoleillement.

Réduction du bruit de mesure

Le Focus^{3D} X 330 fournit des données numérisées d'excellente qualité, avec un bruit de mesure très réduit, sur une grande distance.

Wireless LAN

La télécommande WLAN du Focus^{3D} permet de démarrer, stopper ou visualiser des numérisations à distance.

Numérisation de longue portée en plein soleil

Le FARO Focus^{3D} X 330 est un scanner laser 3D ultrarapide qui présente une longue portée. Il offre des possibilités entièrement nouvelles : il peut numériser des objets jusqu'à 330 m de distance, même en cas de fort ensoleillement. Avec son récepteur GPS intégré, le scanner laser est capable de mettre en corrélation des numérisations individuelles lors du post-traitement, ce qui le rend idéal pour les applications de relevé 3D.

Grâce à l'amélioration de la qualité de numérisation et de la portée, le FARO Focus^{3D} X 330 réduit considérablement la charge de travail lors des opérations de relevé et de post-traitement. Les données numérisées 3D peuvent être facilement importées dans les logiciels utilisés pour la reconstitution d'accidents, l'architecture, le génie civil, la construction, les enquêtes médico-légales, l'industrie ainsi que le relevé topographique. Les calculs de distances, de surfaces et de volumes, les tâches d'analyse, d'inspection et de documentation peuvent ainsi être effectués rapidement, avec précision et en toute fiabilité.

Avantages

Le FARO Focus^{3D} X 330 est l'appareil idéal pour le relevé laser et la documentation 3D.

Sa longue portée de numérisation de 330 m, son GPS intégré, la possibilité de faire des relevés même en plein soleil ainsi que le boîtier de protection conçu spécialement pour le scanner en font l'outil parfait pour les relevés en extérieur.

FARO[®] Laser Scanner Focus^{3D} X 330

Caractéristiques de performances Focus^{3D} X 330

Unité de mesure de distance

Intervalle d'ambiguïté : Portée du Focus^{3D} X 330 : Taux de scan (points /s) : Incertitude de mesure¹:

De 122 000: 488 000 pts/s. à 614 m ; 976 000 pts/s.: 307 m 0,6 m - 330 m en intérieur ou extérieur avec incidence verticale sur une surface réfléchissante à 90 % 122 000 / 244 000 / 488 000 / 976 000 ±2 mm

Bruit de mesure ²	à 10m	à 10 m - compression du bruit ³	à 25m	à 25 m - compression du bruit ³
à 90 % de réfl.	0,3 mm	0,15 mm	0,3 mm	0,15 mm
à 10 % de réfl.	0,4 mm	0,2 mm	0,5 mm	0,25 mm

Unité couleur

Résolution : Couleur dynamique : Parallaxe :

Couleur jusqu'à 70 mégapixels Adaptation automatique de la luminosité Design coaxial

0,009° (40 960 points 3D sur 360°) / 0,009° (40 960 points 3D sur 360°)

SD, SDHC[™], SDXC[™]; carte de 32 GB fournie avec l'appareil

Nivelle chaque numérisation ; précision 0,015° (plage de mesure ±5°)

possibles sur des terminaux mobiles équipés de Flash®.

cardinaux. Une fonction de calibrage est disponible.

Déflecteur

Lona Diver

Diam

Champ de vision (vertical/hor.) : Résolution (verticale/hor.) : Vitesse max. de rotation du miroir :

Laser (émetteur optique) Classe

e laser :	Laser de classe 1
Jeur d'onde :	1 550 nm
gence du rayon :	Typique 0,19 mrad (0,011°) (1/e, demi-angle)
ètre du rayon (à la sortie) :	Typique 2,25 mm (1/e, demi-angle)

300° / 360°

5 820 rpm ou 97 Hz

Par écran tactile et WLAN

l'attribuer aux numérisations.

Gestion des données et commande

Stockage des données : Commande du scanner : Nouvel accès WLAN :

Multi-Capteurs

Compensateur biaxial : Capteur de hauteur :

Boussole⁴:

GPS :



Récepteur GPS intégré ¹ L'incertitude de mesure se définit comme une erreur systématique de mesure à 10 m et 25 m, un sigma, ²Le bruit de mesure est défini comme l'écart standard des valeurs sur le meilleur plan d'ajustement à une vitesse d'acquisition de 122 000 points /s.³ Un algorithme de compression du bruit peut être activé, comprimant ainsi le bruit des données brutes par un facteur de 2 à 4. Informations susceptibles d'être modifiées sans indication préalable.⁴ Des objets ferromagnétiques peuvent perturber le champ magnétique terrestre et rendre les mesure imprécises.

La commande du scanner à distance, la visualisation et le téléchargement des numérisations sont

La boussole électronique fournit aux numérisations des données d'orientation par rapport aux points

Un baromètre électronique permet de calculer la hauteur relative par rapport à une valeur de référence et de

Général

Alimentation électrique :

Consommation électrique :

Autonomie de la batterie : Température : Humidité :

19 V (alimentation externe) 14,4 V (batterie interne) 40 W et 80 W (pendant la charge de la batterie) 4.5 heures 5° - 40° C Sans condensation

Connecteur du câble : Poids : Dimensions : Maintenance / Calibrage : Situé dans le support du scanner 5,2 kg 240 x 200 x 100 mm Une fois par an





GSA Contract Holder

Global Offices: Australia • Brazil • China • France • Germany India • Italy • Japan • Malaysia • Mexico • Netherlands Philippines • Poland • Portugal • Singapore • Spain • Switzerland Thailand • Turkey • United Kingdom • USA • Vietnam

www.faro.com Freecall 00 800 3276 7253 info@faroeurope.com



Annexe 3 Logiciels utilisés

Logiciels utilisés pour une étude

Nota : *imprimé émis et géré par DSE* Cette fiche est annexée au rapport.

Direction opérationnelle : DRS Unité : AS2G

Référence étude / CGR :

LiDAR terrestre à longue portée : un retour d'expérience sur son utilisation dans des contextes d'instabilité de pente CGR 201986

LOGICIEL	VERSION	FICHIER DE CONFIGURATION	Donnees de sortie / Resultats
RISCAN PRO	v. 2.8.2	1	Traitement et modélisation 3D des nuages de points
Trimble RealWorks	v. 11.1.1.442	1	Traitement et modélisation 3D des nuages de points
Rhino	V. 6	1	Modèle géométrique de la zone d'étude
Griddle	v. 1.05	1	Modèle géométrique de la zone d'étude

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée



