



**HAL**  
open science

# Le suivi des éboulements par photogrammétrie aérienne et terrestre et/ou par scanner laser terrestre, dans le cadre des dangers naturels

Solène Roussel-Galle

## ► To cite this version:

Solène Roussel-Galle. Le suivi des éboulements par photogrammétrie aérienne et terrestre et/ou par scanner laser terrestre, dans le cadre des dangers naturels. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-02094144

**HAL Id: dumas-02094144**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02094144>**

Submitted on 9 Apr 2019

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

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



**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MEMOIRE**

**Présenté en vue d'obtenir**

**Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**Par**

**Solène ROUSSEL-GALLE**

---

Le suivi des éboulements par photogrammétrie aérienne et terrestre et/ou par scanner laser  
terrestre, dans le cadre des dangers naturels

**Soutenu le 3 Juillet 2018**

---

**JURY**

**PRESIDENT : M. Laurent MOREL**

**Directeur ESGT**

**MEMBRES : M. Gérard SOLLBERGER  
M. Jérôme VERDUN**

**Maitre de stage  
Professeur référent**

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon développement et la concrétisation de ce travail de fin d'études, m'apportant beaucoup de connaissance supplémentaire dans des domaines que j'affectionne très particulièrement.

Dans un premier temps, je tiens à remercier mon maître de stage, **M. Sollberger Gérard**, ainsi que **M. Kohler André** dirigeant de l'entreprise, pour m'avoir chaleureusement accueilli et encadré tout au long de ce projet, pour ses précieux conseils, sa patience et la confiance que ce dernier m'a accordée. Mes remerciements sont aussi, bien sûr, adressés à **l'équipe de HKD Géomatique Vaud SA** dans son intégralité, pour leur accueil chaleureux, les très bons moments passés, tant socialement que culturellement, avec chacun d'entre vous.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la disponibilité et l'aide de l'équipe de l'unité des dangers naturels, avec **M. Gerber Christian** et **Mme Pigeon Mélanie**, qui ont mandaté l'entreprise pour la réalisation de ce travail. L'apport de leur connaissance dans le domaine des phénomènes naturels m'a été très précieux et je les remercie grandement pour cette enrichissante contribution.

Je tiens aussi à remercier vivement les professeurs de l'école d'Yverdon-les-Bains, **M. Barras Vincent** et **M. Cannelle Bertrand**, qui m'ont aimablement autorisé l'utilisation de leur matériel et judicieusement conseillés pour mes travaux. Merci aussi à **M. Chevallier Nicolas** pour son accompagnement sur le terrain lors de mes différentes expérimentations.

J'adresse aussi tous mes plus grands remerciements à **M. Verdun Jérôme** pour ses nombreuses relectures attentives et ses multiples conseils avisés au cours des différentes phases du projet, me permettant de mener à bien ce dernier.

Enfin, il est inévitable de remercier mon frère, **Cédric G.** et sa magnifique femme, **Charlotte G.**, pour m'avoir accueilli ces derniers mois, pour leur gentillesse et leur bienveillance. Merci infiniment aussi à mon petit neveu, merveilleusement ingénieux, avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Merci aussi à toutes les autres personnes qui m'ont aidé dans la concrétisation de ce travail, principalement **ma mère**, ma force, mon pilier, mon modèle. Mon **Victor B.** (*la pièce du puzzle manquante*) et son réconfort apporté chaque jour, ses marques d'affection, son aide et ses conseils. Un grand merci à **Cyrille Gomez**, Grand Monarque, qui n'a cessé de me supporter depuis la Prépa, ainsi qu'à mon très cher parrain **Olivier M. et Baptiste F.** pour leurs rassurants conseils. Merci enfin, à toutes les personnes que je ne peux citer, ma famille, mes amis, ceux qui m'ont toujours encouragé dans ma scolarité, et m'ont aidé au très bon déroulement de ce travail.

## Liste des abréviations

EPFL : École Polytechnique Fédérale de Lausanne

HEIG-VD : Haute École d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud

ICP : Iterative Closest Point

M3C2 : Multiscale Model to Model Cloud Comparison

RMS : Root Mean Square

TLS : Terrestrial Laser Scanning

UDN : Unité des Dangers Naturels

## Glossaire

**Aléa** : Se traduit par la probabilité d'occurrence, en un point donné, d'un phénomène naturel de nature et d'intensité définie. Du fait de la grande variabilité des phénomènes naturels et des nombreux paramètres qui interviennent dans leur déclenchement, l'aléa ne peut être qu'estimé. Son évaluation reste en partie subjective : elle fait appel à l'ensemble des informations recueillies au cours de l'étude, au contexte géologique, aux caractéristiques et à l'appréciation du chargé d'étude. Pour limiter l'aspect subjectif, des grilles de caractérisation des différents aléas ont été définies à l'issue de séances de travail regroupant des spécialistes de ces phénomènes.

**Danger** : Le phénomène naturel qui peut causer des dommages décrits en termes de sa géométrie et de ces caractéristiques mécaniques et autres. Le danger peut exister (comme une pente qui flue) ou être potentiel (comme une chute de bloc). La caractérisation du danger ou d'une menace n'inclut pas sa prédiction.

**Évaluation du risque** : Le processus menant à une prise de décision ou à une recommandation indiquant que les risques existants sont tolérables et que les mesures de contrôle du risque sont adéquates. Sinon, des mesures alternatives de contrôle sont justifiées et doivent être mises en place. L'évaluation du risque comprend son analyse.

**ICP** : de l'anglais « Iterative Closest Point » est un algorithme permettant de recalculer deux nuages de points en minimisant, grâce à des itérations successives, la distance entre ceux-ci.

**RMS** : de l'anglais « Root Mean Square » signifiant « Erreur moyenne quadratique », caractérise la précision globale d'un ensemble de mesure à l'issue des traitements.

**Suivi** : On parle de suivi d'un site lorsqu'au cours de la phase de reconnaissance il s'avère nécessaire de mesurer le comportement de l'aléa, en général son mode et sa vitesse de déplacement. [...] On parle aussi de suivi lorsque, après un événement, on continue à suivre un site pendant un certain temps par mesure de sécurité « résiduelle » ou par intérêt scientifique.

# Table des matières

Remerciements .....	2
Liste des abréviations .....	3
Glossaire .....	4
Table des matières .....	5
Introduction .....	7
<b>I ÉTUDE DES ELEMENTS, DES LIEUX ET DES TECHNOLOGIES EXPLOITABLES.....</b>	<b>9</b>
I.1 CARACTERISATION DES ELEMENTS ET DES SITES POTENTIELS A L'ETUDE.....	9
I.1.1 Étude des éléments à déceler .....	9
I.1.2 Constats des environnements et analyse des besoins .....	11
I.2 LES TECHNIQUES EXPLOITABLES .....	14
I.2.1 Aspect théorique des techniques de lasergrammétrie .....	14
I.2.2 Aspect théorique des techniques de photogrammétrie .....	15
I.2.3 Inventaire des méthodes et réflexion sur celles exploitables .....	16
I.2.4 Le géoréférencement des techniques .....	18
<b>II APPLICATION DES METHODES EN SITE « TEST » : LA FALAISE DE BURSINS .....</b>	<b>19</b>
II.1 PRESENTATION DU SITE .....	19
II.2 ACQUISITION DES DONNEES ET GENERATION DU NUAGE DE POINTS .....	20
II.2.1 Lasergrammétrie .....	20
II.2.1.1 Acquisition des données .....	20
II.2.1.2 Génération du nuage de points et géoréférencement .....	21
II.2.2 Photogrammétrie.....	23
II.2.2.1 Acquisition des données .....	23
II.2.2.2 Génération du nuage de points.....	26
II.2.2.3 Géoréférencement des nuages de points .....	29
<b>III TRAITEMENTS DES NUAGES DE POINTS.....</b>	<b>30</b>
III.1 OUTILS DE TRAITEMENT .....	30
III.1.1 Détection de changement : CloudCompare et l'Algorithme M3C2.....	30
III.1.1.1 Principe de calcul.....	31
III.1.1.2 Application de l'algorithme .....	31
III.1.2 Volumétrie .....	34
III.1.3 Explications des analyses.....	35
III.2 ANALYSE VIA LE GEOREFERENCEMENT .....	36
III.2.1 Distances M3C2 : Nuage complet nettoyé de la végétation.....	36
III.2.2 Distances M3C2 : Zone sans mouvement.....	37
III.2.3 Distances M3C2 : Zone de chute de bloc .....	38
III.2.4 Volumétrie : Nuage complet nettoyé de la végétation .....	40
III.2.5 Volumétrie : Zone de chute de bloc .....	41
III.2.6 Volumétrie : Zone de plus grande envergure pour confirmer la marge d'erreur .....	42
III.3 ANALYSE VIA LA METHODE ICP.....	43
III.3.1 Distances M3C2 : Nuage complet nettoyé de la végétation.....	44
III.3.2 Distances M3C2 : Zone sans mouvement.....	45

III.4	VALIDATION DE L'OUTIL ET DE LA METHODE .....	47
<b>IV</b>	<b>APPLICATION EN CAS REEL .....</b>	<b>48</b>
IV.1	PRESENTATION DU SITE .....	48
IV.2	PREPARATION ET ACQUISITION DES DONNEES .....	49
IV.3	GENERATION DU NUAGE DE POINTS .....	50
IV.4	DETECTION DE CHANGEMENT M3C2.....	52
IV.5	BILAN.....	53
<b>V</b>	<b>PERSPECTIVES .....</b>	<b>54</b>
V.1	AMELIORATION DE LA SIMPLICITE DE LA METHODE .....	54
V.2	PROPOSITION D'UN FLUX DE TRAVAIL OPTIMAL .....	55
V.3	LE RENDU DES DONNEES .....	56
	Conclusion.....	57
	Bibliographie .....	59
	Table des annexes.....	60
	Annexe 1 Fiche des sites étudiés .....	61
	Annexe 2 Calcul de photogrammétrie .....	68
	Annexe 3 Feuille de calcul réalisé sur un tableur Excel.....	69
	Annexe 4 Visualisation des nuages générés sur Pix4D.....	70
	Annexe 5 Visualisation des nuages générés sur Agisoft.....	73
	Annexe 6 Tableau de comparaison des nuages générés sur Pix4D et Agisoft.....	74
	Liste des Figures.....	75
	Liste des tableaux .....	77
	Résumé .....	78

## Introduction

Ce travail porte sur une problématique d'actualité qui est l'étude des instabilités rocheuses de type « **chute de pierre et de blocs** » et « **éboulement** ». Ce projet est réalisé en collaboration directe avec l'équipe de l'Unité des Dangers Naturels du Canton de Vaud (Suisse), chargée de s'assurer de la protection de la population et des biens de valeurs notables contre les dangers naturels.

Il a été convenu de cibler comme objectif premier le développement d'une **méthode simple, rapide et répétable** facilement pour la réalisation d'une **modélisation tridimensionnelle** globale à **différentes époques** des parois rocheuses, en évitant au maximum l'intervention des technologies lourdes et fortement coûteuses. Ces premières informations énoncées constituent les contraintes principales du projet et du cahier des charges approuvées par l'UDN : **la simplicité, la rapidité, la répétabilité, et le coût.**

L'étude des phénomènes naturels liés à la dynamique terrestre constitue un enjeu majeur pour les professionnels concernés. La compréhension du comportement de la paroi et des instabilités liées à celle-ci permet **une meilleure appréciation et gestion du risque**. En d'autres termes, les diverses analyses qui pourront être effectuées par les personnes impliquées, comprenant les études détaillées des zones instables, amènent à des estimations qui découlent vers l'évaluation du risque et l'adoption de stratégies qui visent à sa réduction (Vuillemin 2009). En conséquence, nous serons amenés au cours de ce projet à déployer des méthodes et des techniques qui permettront, facilement, de détecter les zones d'activités des pans rocheux, dans le cas où les instabilités ne sont que partiellement, voire totalement inconnues.

En raison de l'escarpement des sites, les études de **suiti entre époques** des dangers gravitaires peuvent être très difficiles à mener, à cause de l'impossibilité d'un accès direct et de la dangerosité permanente des chutes de pierres et de blocs, ce qui restreint l'action des professionnels habitués à l'approche traditionnelle du terrain. Les géologues doivent par conséquent utiliser des méthodes d'approche déportées (observations à la jumelle, inspection rapide par survol hélicoptères...) qui restent jusqu'à présent essentiellement qualitatives.

En plus de ces **contraintes de proximité et d'accessibilité aux sites**, il conviendra, dans le cas d'une mise en œuvre simple, de **s'affranchir au maximum de la mise en place de cible artificielle et de points matérialisés au sol**. De surcroît, pour assurer un suivi et détecter les zones instables caractérisées par des chutes et décrochements, il conviendra d'acquérir des données d'époques différentes pour les comparer par la suite. Il sera donc étudié les techniques permettant d'intégrer les données dans un même référentiel. Il faudra aussi prendre en considération l'environnement naturel du site qui est l'aspect le plus problématique dans le cas de la mise en œuvre de technique.

Il n'existe pas de méthode « unique » s'adaptant à tous les cas, ni de protection absolue contre les événements extrêmes. Cependant, de nombreux outils existent et peuvent être mis en œuvre, et ce suivant l'importance et le coût des moyens matériels et humains consenti pour une surveillance fiable et durable des phénomènes naturels.

Dans le cadre de cette collaboration, il devra être déployé des techniques permettant la **modélisation tridimensionnelle** d'une surface, et non **pas de mesures ponctuelles**. Les systèmes de surveillance tels que les détecteurs de mouvement, les mesures radars ou encore les mesures ponctuelles de type « extensomètre » ne sont en aucun cas traités dans ce rapport, même si ces technologies sont idéales pour une action rapide et fiable. De plus, les technologies LiDAR aéroportées et les mesures de surveillance par interférométrie radar sont aussi écartées, impliquant des mesures lourdes et coûteuses, avec l'appel à une entreprise spécialisée.

Finalement, les techniques qui pourront être étudiées dans le cas présent devront être de type terrestre ou aérien, dans des conditions limitées de hauteur de vol. La nécessité de trouver un compromis entre le coût des techniques engagées, la simplicité de (ou des) méthode(s) mise (s) en œuvre ainsi qu'une qualité des données suffisante amène à penser que la méthode recherchée doit être **utilisable directement par l'UDN**, à l'aide des professionnels de la mesure.

Pour mener à bien ce projet, nous avons réalisé ce travail en différentes phases :

- Phase 0 : Établissement du cahier des charges, en collaboration avec l'UDN
- Phase 1 : Étude bibliographique des projets déjà effectués
- Phase 2 : Étude des sites et rencontres des professionnels intéressés
- Phase 3 : Étude des méthodes utilisables et déploiement sur site d'essai
- Phase 4 : Traitements des données brutes
- Phase 5 : Confrontation des techniques et choix
- Phase 6 : Essai de la méthode choisi en cas réel
- Phase 7 : Bilan et rédaction de ce document

Les phases de ce projet constituent par conséquent l'organisation elle-même de ce rapport. En premier lieu, une étude des éléments à déceler et un constat des environnements seront réalisés, pour aboutir sur une confrontation des techniques qui mènera à des choix pour une application en site test. Dans un second temps, il sera présenté les acquisitions en site d'essai et la génération des nuages de points pour les techniques choisies, ce qui mènera aux traitements des nuages de points. Dans une troisième partie, il sera étudié en détail le principe de détection de changement entre deux nuages de points, ainsi que la volumétrie des éléments éboulés. La validation d'une méthode sera effectuée, et celle-ci sera mise à l'épreuve en cas réel. Ce travail se terminera sur un bilan complet et sur des propositions en vue de l'avenir.

# I Étude des éléments, des lieux et des technologies exploitables

## I.1 Caractérisation des éléments et des sites potentiels à l'étude

### I.1.1 Étude des éléments à déceler

Dans un premier temps, il est indispensable de définir le type de configuration qui sera étudié avant de rentrer dans le détail du phénomène lui-même, le projet étant porté sur la chute d'élément provenant des falaises, aussi nommées parois rocheuses.

Une **falaise** est un escarpement vertical ou sub vertical abrupt, avec un angle supérieur à 30 ° ou 50 °, caractérisée par sa nature, sa lithologie, sa structure géologique, sa hauteur et son processus d'érosion (Feldmann 2017). Cependant, le terme de falaise sera employé de manière générique comme mentionnée dans la thèse de J. D'Amato (2017), nous désignerons ici « une paroi rocheuse indépendamment de son environnement (montagneux ici, et non pas côtier) », l'étude étant portée sur des parois rocheuses présentes à travers le paysage préalpin et jurassien.

Les phénomènes naturels à déceler dans le cadre de ce projet sont de type « **chute de pierres et blocs** » (cf. Figure 1) et « **éboulements** » (cf. Figure 2), il convient donc d'étudier leurs caractéristiques. Cette analyse servira à l'élaboration d'une « taille » minimum devant être détectée par la technologie qui sera employée. Il faut donc qualifier ces dangers gravitaires dont les composantes principales permettant de classer ces éléments sont le **diamètre** et le **volume** des éléments éboulés ou ayant chuté. Plusieurs définitions peuvent être trouvées, se sont celles provenant du lexique général servant à l'équipe de l'UDN qui seront appliquées, définitions aussi utilisées dans la thèse de J. D'Amato (2017).



Figure 1 : Exemple d'une chute de blocs en pied de falaise à Lavey-les-bains, 2018



Figure 2 : Exemple d'un éboulement sur la plaque tournante CFF à Vallorbe, Décembre 2010.

**Les chutes de pierres et blocs** forment des composants isolés dont le volume peut atteindre plusieurs mètres cubes (cf. Figure 1). Le mouvement s'effectue par chute, rebond et roulement, et la vitesse des éléments peut atteindre 110 km/h. Ces mouvements de masses rocheuses sont très rapides, discontinus et brutaux, résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que le calcaire, le grès ou encore les roches cristallines.

**Les éboulements** sont formés par un paquet de roche dévalant une montagne (cf. Figure 2). Le volume total mobilisé durant un événement est compris entre 100 et 100 000 m<sup>3</sup>, et la vitesse de déplacement varie entre 35 et 145 km/h. Les écroulements quant à eux, aussi appelés « éboulement en grande masse », correspondent à un volume total supérieur au million de m<sup>3</sup>.

Sur la base de ces définitions, il peut être établi une distinction des éléments en fonction de leur calibre (cf. Figure 3).

Il peut être distingué : les **pierres** d'un volume inférieur à 1 dm<sup>3</sup>, les **blocs** d'un volume compris entre 1 dm<sup>3</sup> et 1 m<sup>3</sup>, et les **gros blocs**, d'un volume compris entre 1 m<sup>3</sup> et 100 m<sup>3</sup>. Au-delà de 100 m<sup>3</sup> de volume total mobilisé, nous parlerons d'**éboulement**.

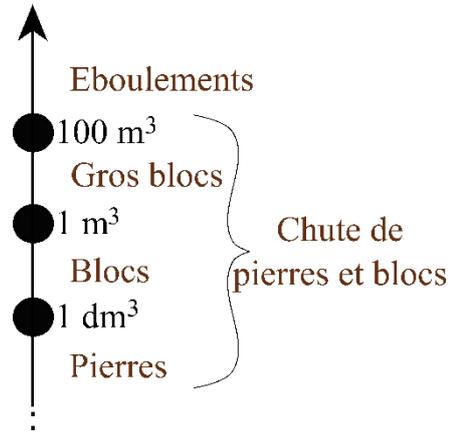


Figure 3 : Caractérisation des éléments en fonction de leur volume

Pour correspondre aux définitions émises précédemment, le seuil de détection des éléments fut placé à la **limite entre une pierre et un bloc**, soit **1 dm<sup>3</sup>**, équivalent à **1 litre**, et correspondant à un élément de **10 cm** de côté environ. Pour détecter ce type d'élément, il faudra donc engager des méthodes d'acquisition trois fois plus précises que ce seuil. Cependant, sans l'implication de technique de haute précision ni de mise en place de cibles artificielles, la détection d'un élément de cette taille peut être fastidieuse avec l'utilisation de méthode simple et peu couteuse. De plus, lorsqu'un élément de cette dimension se décroche, il est probable de retrouver un ensemble de pierres ayant chuté, et non pas une seule.

L'objectif premier de ce travail est d'effectuer une surveillance globale des parois rocheuses dont l'activité est mal connue, voire totalement inconnue, permettant aux professionnels une compréhension du comportement de la paroi rocheuse. Une telle surveillance permettra d'obtenir une idée de l'évolution de la paroi au cours du temps, d'alimenter le cadastre des événements ou encore de savoir si la mise en place d'une surveillance plus poussée ou de moyens de protection doit avoir lieu.

Après avoir énuméré les contraintes principales du projet, des contraintes supplémentaires en lien direct avec la configuration du site en lui-même peuvent être ajoutées. La méthode mise en œuvre doit s'adapter à l'environnement, c'est pourquoi une étude des sites a été effectuée pour relever les contraintes supplémentaires, ce qui est détaillé ci-après.

## I.1.2 Constats des environnements et analyse des besoins

Préalablement à l'étude des technologies pouvant être mises en œuvre, une visite des différents sites, ou tout du moins, une étude de ces derniers fut réalisée. Les géologues sont confrontés à des situations parfois particulières et ce constat des environnements permet une compréhension des besoins ainsi que de relever les différentes contraintes des sites.

L'observation directe du site avant toute chose est indispensable, la structure de la falaise en elle-même apporte des données essentielles aux géologues et aux géomètres pour la mise en application des mesures. La présence de végétation, des réseaux d'écoulement, la présence d'éboulis en pied de falaise ou de cicatrice le long de la paroi apportent des informations précieuses et contribuent à la recherche des instabilités qui n'ont pas encore été mises en évidence (D'Amato 2017).

Au total, sept sites ont été proposés à l'étude et cinq sites d'entre eux ont été visités pour permettre une appréciation de leur état. La présentation des zones est effectuée à l'aide de « fiches de sites » (cf. Annexe 1) reprenant les caractéristiques principales de ces dernières. Pour permettre une lecture plus claire, seul le numéro du site est mentionné i.e. Rochers de Toveyres (*Site n°1*), faisant toujours référence à l'Annexe 1. Avec l'analyse de ces zones, les contraintes qui s'ajoutent au projet sont énumérées ci-dessous.

### L'accessibilité :

L'accès à la zone rocheuse peut se faire facilement et rapidement par voie carrossable, ou au contraire, dans le cas des falaises de Veytaux (cf. Figure 4 et *Site 5*), l'accès se fait uniquement à pied à partir de la vallée et est seulement visible depuis l'Autoroute A9 ou depuis un point de vue fortement éloigné.

### La configuration particulière ou l'utilisation spéciale qui en est faite :

Les Monts d'Arvel (cf. Figure 5 et *Site 2*) sont utilisés en tant que carrière, ce qui induit une évolution très rapide du site, ou encore le rocher de Toveyres (cf. Figure 6 et *Site 1*), situé en bord de route avec au-dessus de ce dernier une maison d'habitation, et en dessous, une voie de chemin de fer.



Figure 4 : Falaise de Veytaux  
Source : personnelle - Date de prise de vue : 2018.02.21



Figure 5 : Monts d'Arvel  
Source : [www.sos-arvel.ch](http://www.sos-arvel.ch)



Figure 6 : Rocher de Toveyres  
Source : UDN

### L'espace présent sur le site pour la mise en œuvre et la proximité au site :

Le rocher de Toveyres (cf. Figure 6 et *Site 1*) en bord de route engendre une proximité au site et un point de vue complexe. De même que les falaises de Vallorbe (cf. *Site 4*) qui surplombe une voie départementale, interdisant un certain espace de mise en œuvre et obligeant la proximité au site. Au contraire, le cas d'Ollon (cf. Figure 7 et *Site 2*) offre un espace suffisant et n'oblige pas à la proximité du site.

### La végétation :

La présence de végétation et son type peut être un réel inconvénient, celle-ci pouvant être dense ou inexistante. Dans différents cas il fut remarqué la présence de végétation arborée à fonction protectrice telle qu'à Lavey-les-Bains (cf. Figure 9 et *Site 3*) ou à Veytaux (cf. Figure 4 et *Site 5*), ou de la végétation arbustive directement sur la paroi telle qu'à Bex (cf. Figure 8 et *Site 6*) entraînant la désolidarisation des blocs.



Figure 7 : Falaise et glissement d'Ollon



Figure 8 : Falaise de Bex



Figure 9 : Falaise de Lavey-les-Bains

### La hauteur des parois :

Les falaises étudiées peuvent être de très grande hauteur comme les Monts d'Arvel (cf. Figure 5 et *Site 2*) ou les falaises de Lavey-les-Bains (cf. Figure 9 et *Site 3*) avec plus de 1 000 m de dénivelée. En comparaison à des falaises de faible hauteur comme le Rocher de Toveyres (cf. Figure 6 et *Site 1*) et la falaise de Bex (cf. Figure 8 et *Site 6*) d'une hauteur de 30 m maximum, ou encore la falaise d'Ollon (cf. Figure 7 et *Site 7*) avec une dénivelée d'environ 100 m.

### Les aménagements présents sur le site :

La présence de treillis métalliques ou de filets a principalement été recensée comme pouvant être une contrainte à l'acquisition, par exemple au rocher de Toveyres (cf. Figure 10 et *Site 1*) où ces éléments sont présents tout autour de la zone d'étude, ou encore sur le site d'Ollon (cf. Figure 7 et *Site 7*) ou la prévision d'une mise en place de ce type d'aménagement a été émise.



Figure 10 : Rocher de Toveyres, présence d'un treillis métallique plaqué et cloué

### La dangerosité du site :

Ceci ne permettant pas l'acquisition par n'importe quel moyen comme dans le cas du Rocher de Toveyres (cf. Figure 6 et *Site 1*), de Vallorbe (cf. *Site 4*) ou de Veytaux (cf. Figure 4 et *Site 5*) surplombant l'Autoroute A9. La proximité d'une route très passante entraîne une grande dangerosité pour la personne qui sera responsable d'exécuter les acquisitions. Le site en lui-même peut aussi être particulièrement dangereux, lié directement à l'instabilité des blocs et à la probabilité de chute. Par exemple à Ollon (cf. Figure 7 et *Site 7*), avec le déclenchement d'un phénomène de glissement de terrain très récent, rendant instable cette partie et entraînant un risque élevé de réactivation du phénomène.

Dans le tableau suivant (cf. Tableau 1), les contraintes supplémentaires détaillées précédemment sont synthétisées pour chaque site.

Pour simplifier la lecture de celui-ci, les cases vertes représentent des avantages et les cases en orange, des contraintes. Cependant les valeurs O/N (signifiant Oui/Non) répondent à la problématique, mais ne correspondent pas aux couleurs Vert/Orange i.e. Avantage/Contrainte, car l'harmonisation de ce tableau tout en restant compréhensible et simple reste complexe.

	<div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Rochers de Toveyres</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Monts d'Arvel</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Lavey-les-bains</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Vallorbe</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Veytaux</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Bex</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Olhon</div> </div>						
Annexe 1 - Site n°	1	2	3	4	5	6	7
Facile d'accessibilité	O	O	O	O	N	O	O
Configuration particulière ou d'utilisation spécifique	O	O	N	N	O	N	N
Espace aisé pour la mise en œuvre	N	O	O	N	N	O	O
Eloignement à la paroi possible	N	O	O	N	N	O	O
Présence faible de végétation	O	O	N	O	N	N	N
Paroi de faible hauteur	O	N	N	N	N	O	O
Aménagements de type filets ou treillis métalliques	O	N	N	O	N	N	N
Site dangereux	O	O	N	O	O	N	O

O=Oui
N=Non
Avantage
Contrainte

Tableau 1 : Synthèse des contraintes selon les sites

Après avoir énuméré les contraintes qui s'ajoutent au projet et synthétisé celles-ci (cf. Tableau 1), le choix des méthodes exploitables peut être réalisé avec la prise en compte de cette analyse et des contraintes relevées.

Dans le cadre de ce projet, la méthode mise en place devra permettre la modélisation en trois dimensions du site étudié. Par conséquent, seules les méthodes permettant ce résultat seront étudiées, c'est-à-dire les méthodes de **photogrammétrie** et de **lasergrammétrie**.

## I.2 Les techniques exploitables

Préalablement au choix des méthodes, il est utile de procéder à un rappel théorique des méthodes de lasergrammétrie et de photogrammétrie.

### I.2.1 Aspect théorique des techniques de lasergrammétrie

Les scanners lasers permettent une acquisition rapide et automatique d'un nuage de points dense en utilisant la technique de balayage laser, et ayant comme support d'information la lumière laser permettant un relevé sans contact direct avec l'objet (Grussenmeyer et Landes 2011). Le terme « **LASER** » quant à lui provient de l'anglais « **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** » signifiant qu'une source de lumière cohérente produit une amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Ce rayonnement émis est modélisé sous la forme d'un faisceau de petit diamètre au niveau de sa source, et de divergence connue, engendrant une **augmentation** de la taille de l'**empreinte laser** fonction de la distance à l'objet qui sera balayé (cf. Figure 11).

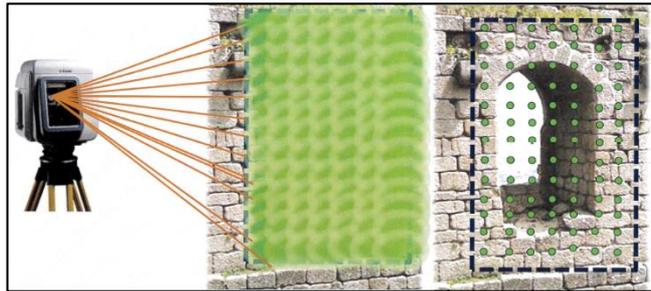


Figure 11 : Acquisition d'une zone selon une trame régulière à droite, à gauche l'augmentation de l'empreinte laser  
Source : M. V. Barras, Cas 3D GEO, inspirée de Formation UNGE 2012, Mme T. Landes, INSA Strasbourg

Le « **balayage laser terrestre** » est une technique qui permet de mesurer un objet, une surface, selon une trame spécifique et régulière (cf. Figure 11) choisie au moment de l'acquisition. Le plus souvent formulée sous forme d'un nombre de points par unité de surface (généralement en  $\text{cm}^2$  ou  $\text{m}^2$ ) ou d'un espacement minimum entre les points à une certaine distance, cela se traduit par le **pas de balayage**.

*Il est important de ne pas confondre les termes de « **résolution spatiale** » et de « **pas du balayage** ». La **résolution spatiale** représente le pas le plus fin que le scanner laser est capable de mesurer à une distance connue de l'objet à modéliser. Le **pas de balayage** est quant à lui l'espacement entre deux points successifs définis par l'utilisateur (Grussenmeyer et Landes 2011).*

L'avantage de cette technique est principalement la capacité de la lumière à être émise selon une bande spectrale très fine, les longueurs d'onde sont généralement situées entre le vert visible et l'infrarouge moyen. Le récepteur lié au scanner enregistre les coordonnées cartésiennes des points et capte aussi l'intensité laser de l'onde retour. Si le scanner laser est aussi doté d'une caméra numérique, chaque impulsion peut aussi être associée à une information de couleur **RVB (Rouge, Vert, Bleu)**. Chaque point du nuage est alors constitué de l'**information 3D** (coordonnées cartésiennes **X**, **Y** et **Z**), de la **réflectivité** (portion du rayon lumineux réfléchi par la surface, fonction de la longue d'onde) et de l'information de **couleur** (code **RVB**). Ces informations sont utiles pour une classification des points, notamment pour séparer la végétation du reste du nuage. Cependant, pour réaliser une classification avec précision, il faut choisir un pas de balayage suffisamment fin pour acquérir l'information nécessaire (Fadili 2015). Le temps passé sur le terrain peut alors considérablement augmenter ce qui constitue un véritable inconvénient selon les cas.

Le rôle de l'opérateur sur le terrain est important et son expérience est essentielle dans le choix de l'emplacement des stations, des cibles et des sphères, dans le choix du paramétrage et la méthode de géoréférencement mise en œuvre.

## I.2.2 Aspect théorique des techniques de photogrammétrie

Par définition, « *La photogrammétrie est la mesure géométrique des objets (leur forme, leur dimension et leur position) à partir d'images* », ceci génère alors plusieurs conditions pour réaliser des mesures 3D à partir d'image. L'objet doit tout d'abord être vu depuis **deux images**, prises depuis des **points de vue différents**. Les photographies doivent aussi posséder un **recouvrement** entre elles, ce qui permet de détecter des **points homologues** entre les images (c'est-à-dire des points correspondant à un même détail). Depuis 2007, plusieurs logiciels commerciaux ou libres ont vu le jour et donnent lieu à la génération de modèle numérique **3D** de manière quasi automatisée, ceci au moyen de la détection automatique des points homologues, servant de points de liaison entre les images avec recouvrement.

La Figure 12 présente une chaîne de traitement classique menant à la production de nuage de points par corrélation d'images. Après avoir effectué l'acquisition des données, la deuxième étape consiste en la détection des points de liaison entre les images grâce aux techniques de **corrélation épipolaire dense**. La troisième étape de ce processus est d'effectuer l'orientation d'un groupe d'images de manière automatique, en utilisant uniquement les points de liaison. Ceci est réalisé par exemple, grâce au **détecteur de Harris**<sup>1</sup> ou la **méthode SIFT**<sup>2</sup>. Enfin, après cette partie de post-traitement, la génération d'un nuage de points dense peut être réalisée et s'appuie sur les propriétés de **géométrie épipolaire**<sup>3</sup> des images (Rose 2012).

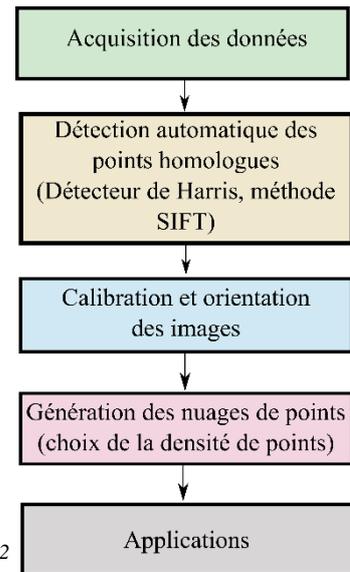


Figure 12 : chaîne de traitement photogrammétrique classique  
Source : inspirée de M. Rose H., Revue XYZ N°131, p.19, 2012

Pour revenir à l'acquisition des photographies, il faut, avant toute mission photogrammétrique, préparer au mieux celle-ci pour optimiser les traitements par la suite. Que la mission s'effectue de manière terrestre ou aérienne, la préparation est semblable. Il faut tout d'abord faire le choix d'un **appareil photo**, ce qui inclue la **taille de capteur** de l'image, qui est en relation avec la **résolution** de ce dernier. À ceci s'ajoute la **focale** qui sera utilisée et la **distance à l'objet**. Par conséquent, il faut choisir le système d'acquisition adapté à la **taille du pixel au sol** voulu (abusivement appelé « **résolution spatiale** » ou « **distance d'échantillonnage** »). Il pourra être trouvé (cf. Annexe 2) un rappel sur les calculs fondamentaux de photogrammétrie ainsi qu'une feuille de calcul réalisé sur Excel (cf. Annexe 3) dans le cadre de ce travail.

<sup>1</sup> Le détecteur de Harris (1988) permet la détection de points d'intérêts, selon plusieurs types de primitives (des points, des segments et contours, des régions) et permet la mise en correspondance par ressemblance entre les primitives dans plusieurs images. (Devernay 2005)

<sup>2</sup> La méthode SIFT - Scale Invariant Feature Transform – introduite par David Lowe en 2004, est aussi une méthode permettant la détection de points d'intérêts au même titre que le détecteur de Harris. C'est cependant un algorithme plus robuste, venant combler les limites des autres méthodes d'extraction de l'information dans une image (elle est notamment capable de mettre en correspondance des points distants avec de fortes variations des paramètres de la caméra). (Poublang 2012)

<sup>3</sup> La géométrie épipolaire permet d'établir la relation géométrique entre deux images grâce à la construction des droites épipolaires passant par les épipoles (points semblables) des images.

### I.2.3 Inventaire des méthodes et réflexion sur celles exploitables

Après avoir procédé à un court rappel théorique sur les méthodes de lasergrammétrie et de photogrammétrie, il faut désormais **évaluer l'aspect pratique** de ces dernières grâce aux **contraintes** émises lors du constat des environnements ainsi que l'analyse des besoins.

Il existe différentes façons de mettre en œuvre les techniques précédemment citées, de manière terrestre, aérienne, ou encore embarquée sur sac à dos, ou sur véhicule. Ces dernières vont être étudiées de manière plus détaillée grâce à un tableau de confrontation basé sur les diverses thématiques émises précédemment (cf. Tableau 2).

Un code couleur est utilisé ici : les cases en vertes sont des atouts, celles en rouge présentent un désavantage, et celles laissées en blanc sont neutres.

Méthode		Photogrammétrie		Lasergrammétrie		
		Terrestre	Aérienne	Terrestre	Embarqué sur sac à dos	Embarqué sur véhicule
Accessibilité	Accessibilité du site via route ou chemin	Facultatif	Facultatif	Facultatif, mais la distance à l'objet peut vite devenir problématique	Facultatif, mais la distance à l'objet peut vite devenir problématique	Obligatoire
	Influence de la topographie du site	Faible. La technique peut s'effectuer à faible ou longue distance (dépendant cependant des conditions atmosphériques et météorologiques). Attention aux zones d'ombre	Faible. Attention au vol hors vue et aux zones d'ombre	Forte. Problématique en fonction de la distance à l'objet, de la dénivelée et déclivité de la paroi. Attention aux zones d'ombre	Pas d'inconvénient a priori	Forte. Problématique en fonction de la distance à l'objet, de la dénivelée et déclivité de la paroi. Attention aux zones d'ombre
	Place pour la mise en œuvre	Besoin d'un minimum d'espace et de recul (deux points de vue obligatoires)	Obligatoire (périmètre de sécurité). Notamment pour le décollage et l'atterrissage	Besoin d'un minimum d'espace et de recul pour la mise en station	Aucun inconvénient	Au minimum la taille de la voiture
Influence du site	Végétation	Problématique en cas de végétation dense	Problématique en cas de végétation dense	Sensible à la couverture végétale, filtrage possible, mais laborieux (n'apporte pas forcément d'avantage)	Sensible à la couverture végétale, filtrage possible, mais laborieux (n'apporte pas forcément d'avantage)	Sensible à la couverture végétale, filtrage possible, mais laborieux (n'apporte pas forcément d'avantage)
	Taille et proximité de la paroi	Solution possible quelque que soit la taille et la proximité. Dépendance directe des caractéristiques techniques. Pas d'acquisition du haut de falaise	Si la taille de la paroi est trop importante attention à la durée du levé, au cas de restriction aérienne et aux influences météorologiques	Dépendance directe du type de scanner et de ces caractéristiques. Besoin d'une distance acceptable et d'une vue dégagée. Pas d'acquisition du haut de falaise	Peut vite devenir problématique en fonction de la proximité de la paroi (Portée maximum d'environ 100 m). Pas d'acquisition du haut de falaise	Solution possible quelque soit la taille de la paroi. Proximité dépendante directement du type de scanner et de ces capacités besoin d'une distance acceptable et d'une vue dégagée. Pas d'acquisition du haut de falaise
	Aménagements déjà en place ou à venir	Problématique en cas de filet ou treillis	Problématique en cas de filet ou treillis	Sensible au filet, filtrage possible, mais laborieux	Sensible au filet, filtrage possible, mais laborieux	Sensible au filet, filtrage possible, mais laborieux

Méthode	Photogrammétrie		Lasergrammétrie			
	Terrestre	Aérienne	Terrestre	Embarqué sur sac à dos	Embarqué sur véhicule	
Le levé	Cas d'un relevé dangereux	Pas d'inconvénient, la photographie à longue distance s'avère possible (dépendant des conditions atmosphériques et météorologiques)	Le matériel peut être menacé et non le pilote	Dépend de la configuration du site et de la proximité de l'élément	Proximité obligatoire. La dangerosité du site est un réel inconvénient ici.	Si pas de route ou blocage de celle-ci, impossible
	Points d'appui, de contrôle ou mise à l'échelle	Possibilité d'utilisation de points stables sans nécessairement mettre en place des cibles (visées sur pierres et pointage directement sur les photographies)	Possibilité d'utilisation de points stables sans nécessairement mettre en place des cibles (visées sur pierres et pointage directement sur les photographies)	Mise en place de cible et de sphère fortement recommandée par les constructeurs. (Visées sur pierres et pointage directement sur le nuage de points difficile)	Mise en place de cible et de sphère fortement recommandée par les constructeurs. (Visées sur pierres et pointage directement sur le nuage de points difficile)	Mise en place de cible et de sphère fortement recommandée par les constructeurs. (Visées sur pierres et pointage directement sur le nuage de points difficile)
	Dépendance de la météo	Forte dépendance de la météo, pluie et brouillard principalement	Forte dépendance de la météo en cas de brouillard et de vent, surtout en zone de paroi rocheuse	Dépend de l'appareil, mais le plus souvent, forte dépendance en cas de brouillard	Influence faible du brouillard, car obligation de proximité à la paroi, seule la pluie est un réel inconvénient	Dépend de l'appareil, mais le plus souvent, forte dépendance en cas de brouillard
	Répétabilité de la méthode	Oui	Oui à condition d'avoir un pilote expert	Oui	Dépend de la topographie et dangerosité du site	Oui
	Précision	Sub-centimétrique, millimétrique ou centimétrique	Sub-centimétrique, millimétrique ou centimétrique	Millimétrique ou centimétrique. La durée d'acquisition peut rapidement augmenter	Centimétrique	Centimétrique
	Le temps d'acquisition	10 min - 2 h	2 h - 4 h problématique de durée de la batterie	30 min - 4 h dépendant du nombre de stations et du paramétrage	30 min - 4 h dépendant du trajet et du paramétrage	30 min - 4 h dépendant du trajet et du paramétrage
	Le temps de traitement	1 - 2 jours	1 - 2 jours	1 - 5 jours	1 - 5 jours	1 - 5 jours
Coût <sup>4</sup> à l'achat (€)	< 20 000	2 000 - 25 000	20 000 - 150 000	100 000 - 200 000	100 000 - 200 000	
Méthode choisie	Méthode répétable facilement, pratique et rapide, même en cas d'inaccessibilité à la paroi. La végétation peut cependant rendre cette méthode difficilement applicable	Méthode facile de mise en œuvre, mais très forte dépendance de la météo et besoin d'une personne formée parfaitement au pilotage	Méthode simple de mise en œuvre, mais le coût reste élevé.	Méthode à expérimenté, mais portée très faible, peut être très problématique en cas de non-accessibilité à faible distance de la paroi	La présence de route ou de chemin à proximité est obligatoire, ce qui en fait une méthode peu adaptable. De plus, technologie beaucoup trop coûteuse, est écartée	

Tableau 2 : Tableau de confrontation des méthodes exploitables dans le cadre d'une modélisation tridimensionnelle

Les techniques de photogrammétrie (terrestre ou aérienne) et de scanners lasers terrestres restent les plus **polyvalentes**. Celles embarquant un scanner laser sur sac à dos ou sur

<sup>4</sup> Les prix sont donnés à titre indicatif, variant fortement selon le modèle d'appareil utilisé, le matériel complémentaire, le logiciel de traitement utilisé ou encore le type d'achat réalisé (leasing, achat neuf ou d'occasion)

véhicule reste **encore très coûteuses** à l'heure actuelle, bien que très utile dans des cas spécifiques. Il apparaît que la photogrammétrie terrestre est plus simple de mise en œuvre. Bien que les techniques de lasergrammétrie soient particulièrement appréciées par les professionnels et mis en œuvre dans des relevés en milieu naturel, la photogrammétrie a su faire ses preuves, tant pour la simplicité que pour son coût de mise en place très faible.

De nombreuses missions de photogrammétrie (aérienne ou terrestre) ont permis la modélisation en trois dimensions des milieux naturels. À titre d'exemple, la modélisation de la dune du Pilat (Simiar 2016) fut réalisée en 2016 ou encore le pic d'Ossau (Ravelet 2016) par voie aérienne par drone. L'utilité des modèles générés est alors sans limites et leur comparaison entre époques permet de déceler des changements, de les quantifier puis de les analyser.

Dans la suite de ce projet, les méthodes de **photogrammétrie aérienne et terrestre**, et de **scanners laser terrestre** seront **mises en œuvre** et seront **comparées**. Il reste à discuter sur la technique de géoréférencement qui sera mise en œuvre.

#### **I.2.4 Le géoréférencement des techniques**

Une fois les acquisitions réalisées, par lasergrammétrie ou photogrammétrie, il faut intégrer celles-ci dans un système de référence, national ou local pour permettre la **comparaison temporelle** des futurs nuages de points et réaliser la détection des instabilités.

Pour géoréférencer un nuage de points, il est primordial de procéder à la mesure des **points de référence** (ou encore appelé des « **points de calage** »), dont la position est connue dans le nuage (ou dans l'image) et dans l'espace terrain, ainsi que des **points de contrôle**, dont la position est connue uniquement dans l'espace terrain, servant à valider le calcul du géoréférencement. Dans **les règles de l'art** et préalablement à l'acquisition elle-même, il est important de procéder à la **mise en place de cibles**, le plus souvent composée d'un damier noir et blanc. Elles peuvent être placées au sol et relevées au GNSS ou au tachéomètre avec prisme dans le but d'une acquisition aérienne, et le long des parois ou sur trépied et relevé au tachéomètre avec la fonction laser dans le but d'une acquisition terrestre. La mise en place pouvant être réalisée de manière pérenne ou non.

En se servant des éléments à disposition sur le site, la mise en place de cibles artificielles sur les lieux sera évitée avec l'utilisation de **cibles naturelles** telles que des **pierres apparentes** le long de la paroi, ou encore des **points « durs »** tels que des angles de bâtiment. Le temps passé sur le terrain se verra optimisé. Dans le cas de zones dangereuses, cela peut aussi être un réel atout puisqu'il n'y a **pas de contact direct avec la zone**, et la sécurité des personnes est donc assurée.

Pour la réalisation de mesure de précision, des cibles artificielles peuvent être disposées le long de la façade, comme dans les travaux réalisés sur la falaise de Hauterive (Barras, Cannelle, et Chapotte 2017), suivie depuis 2014. Avec ce type de mise en œuvre, les **coûts** peuvent se voir très nettement **augmentés** en faisant appel à des **personnes expérimentées**. D'autant plus que la suppression d'une partie ou de la totalité des cibles peut avoir lieu dans l'hypothèse qu'un événement extrême puisse survenir.

La manière de **géoréférencement spécifique** pour chacune des méthodes sera vue dans la suite de ce rapport.

## II Application des méthodes en site « test » : la falaise de Bursins

### II.1 Présentation du site

Préalablement à tout déploiement de méthode dans le cadre d'essai, il a été indispensable de trouver un cas simple réunissant bon nombre d'avantages pour effectuer nos expérimentations. Malgré des sites intéressants proposés par l'UDN (cf. Annexe 1), ceux-ci sont localisés à plus d'une centaine de kilomètres de l'entreprise, il serait par conséquent plus cohérent et moins coûteux de disposer d'une zone de test à proximité.

La falaise doit être de petite envergure et située dans une zone qui ne présente pas de risque, facile d'accès et proche des locaux de **HKD Géomatique Vaud SA** dans lesquels se déroule le projet pour une prise de mesure régulière. La présence de **végétation** est aussi un **inconvenient** comme expliqué précédemment, lors de la visite des sites et de l'inventaire des méthodes exploitables. Pour cette phase de test, la végétation devra n'être que peu présente sur les lieux, et si possible, des bâtiments devront également se trouver sur les lieux pour permettre le géoréférencement ou encore pour contraindre la géométrie des nuages.

En **2016** et **2017**, des acquisitions de photogrammétrie aérienne par drone furent réalisées sur la falaise de **Bursins**. Cette dernière regroupe toutes les caractéristiques essentielles énoncées ci-dessus pour le déploiement de diverses méthodes, avec l'avantage d'avoir déjà été **modélisée en trois dimensions** au cours des dernières années. Le choix de cette falaise en guise de site « test » s'est donc naturellement imposé, réunissant toutes les conditions énumérées précédemment.

Le site est situé à environ **20 km** des locaux de **HKD Géomatique Vaud SA**, au nord de la commune de Bursins (cf. Figure 13), dans une zone déclarée non constructible, servant uniquement de zone de loisir (stand de tir). Par conséquent, des éléments « durs » tels qu'un bâtiment de petite taille et des poteaux d'environ **3 m** de hauteur sont présents sur les lieux. La zone étudiée s'étend sur une longueur de **70 m** et une hauteur de **30 m** (cf. Figure 14) et possède aussi d'autres avantages tels que sa structure géologique.



Figure 13 : Carte de localisation, fond de plan : carte nationale Swisstopo, source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch)



Figure 14 : Site de la falaise de Bursins, source : photographie personnelle

La plupart des études réalisées dans le cadre des milieux naturels se composent, au préalable, de l'étude du site : les **aléas** et les **menaces**, le **risque** et la **dangerosité**, les **avantages** et les **inconvenients**, pour faire ressortir une ou deux méthodes applicables.

Dans cette zone, les objets exposés et les dommages causés sont **faibles** et **insignifiants**. L'**aléa** est de type « **chutes de pierres et blocs** » et « **éboulis** », rentrant dans les critères de détection de ce travail. Le principal atout est la **géologie** de la zone : de type sédimentaire « **fluvio-glaciaire**<sup>5</sup> » qui en fait une couche très **friable**, représentatif d'une zone **instable** et **fragile**, notamment en période de gel et de dégel. Des éléments de volume faible à moyen se décrochent constamment, ce qui permettra la détection de chute d'éléments. Ce qui n'aurait sans doute pas été possible avec des roches dures et cohérentes (tels que le calcaire ou le granite). À quelques années d'intervalle, il est possible de remarquer des **changements notables et importants**, et d'effectuer une vérification visuelle, même directement sur le site.

## II.2 Acquisition des données et génération du nuage de points

### II.2.1 Lasergrammétrie

#### II.2.1.1 Acquisition des données

L'acquisition du nuage de points a été réalisée avec le matériel disponible au bureau, le **TLS Faro Focus 3D X330** (cf. Figure 15). Il est facile d'utilisation, très léger et donc transportable facilement dans le cas d'un relevé en milieu naturel difficile d'accès. Par la suite, son autonomie de 4 h environ permet un temps d'acquisition sur le terrain relativement correct. Les caractéristiques techniques<sup>6</sup> énoncées par le constructeur en font aussi un outil performant, pour un coût relativement accessible. Il est aussi combiné d'un appareil photo HDR permettant la prise de photo servant à coloriser les points du nuage.

Figure 15 : TLS Faro Focus 3D X330

Source : [www.hkd-geomatique.com/technologies](http://www.hkd-geomatique.com/technologies)



Concernant le paramétrage de la densité de points, plusieurs combinaisons sont possibles. Le pas minimum, définissant l'**espacement minimal** entre deux points, est de **3 mm à 100 m** (soit une résolution de 1/1), à cela s'ajoute le paramétrage de « la qualité »<sup>7</sup>. Le pas choisi, pour le cas particulier de relevé des parois rocheuses, doit être assez petit pour déceler les nombreux détails de petite taille. La densité de points choisis ici est de **1,2 cm à 10 m** avec une qualité x4, ce qui apporte une bonne compression du bruit de mesure, et un temps de relevé acceptable de **15 min par station environ**.

<sup>5</sup> Les sédiments fluvio-glaciaires sont des dépôts engendrés par le retrait du glacier. Le terme « moraine » peut aussi être utilisé : ensemble de débris rocheux érodés et véhiculés par les glaciers, puis déposés lorsque ce dernier fond.

<sup>6</sup> Incertitude de mesure +/-2 mm à 10 m ; bruit de mesure +/-0,3 mm à 10 m sur une surface réfléchissante à 90 %, et +/-0,4 mm à 10 m sur une surface réfléchissante à 10 %, sans compression de bruit ; divergence à 1/e de 0,19 mrad

<sup>7</sup> Une qualité x4 signifie qu'un point LiDAR sera calculé à partir de la moyenne de 4 points mesurés réduisant le bruit dans les données, mais réduisant aussi d'un facteur 4 la vitesse de numérisation.

Un seul emplacement de scanner ne peut permettre la génération d'un nuage de points complet, des zones d'ombres apparaissent et la réalité du terrain ne pourra pas être reflétée. Il est donc essentiel d'effectuer **plusieurs numérisations avec un recouvrement suffisant**. À cela s'ajoute la contrainte de **géoréférencement sans cibles**, les nuages acquis depuis plusieurs positions ne peuvent être mis en relation avec les cibles naturelles telles que des pierres, mais plutôt avec les points « durs » tels que les zones bâties. Que cela soit pour la consolidation des nuages entre eux, que pour le géoréférencement global du nuage.

### II.2.1.2 Génération du nuage de points et géoréférencement

Les données acquises au TLS Faro Focus 3D X330 (cf. Figure 15), au format «. fls », sont lues avec le logiciel dédié « Scene ». Le logiciel « Gexcel » est aussi un outil robuste pour le recalage nuage-nuage, mais ce dernier ne sera pas utilisé ici.

Après lecture des données, les deux nuages issus des séries de mesure peuvent être assemblés de manière précise bien que géolocalisés globalement. Le géoréférencement de manière indirecte des deux nuages d'un seul bloc peut rapidement être fastidieux, le recalage des nuages avec l'option « basé sur cibles » ne peut être réalisé puisque la mise en place de cibles artificielles appropriées sur la zone à lever n'a pas eu lieu. La phase de **géoréférencement** du nuage s'effectue donc en **deux étapes** (cf. Figure 16).

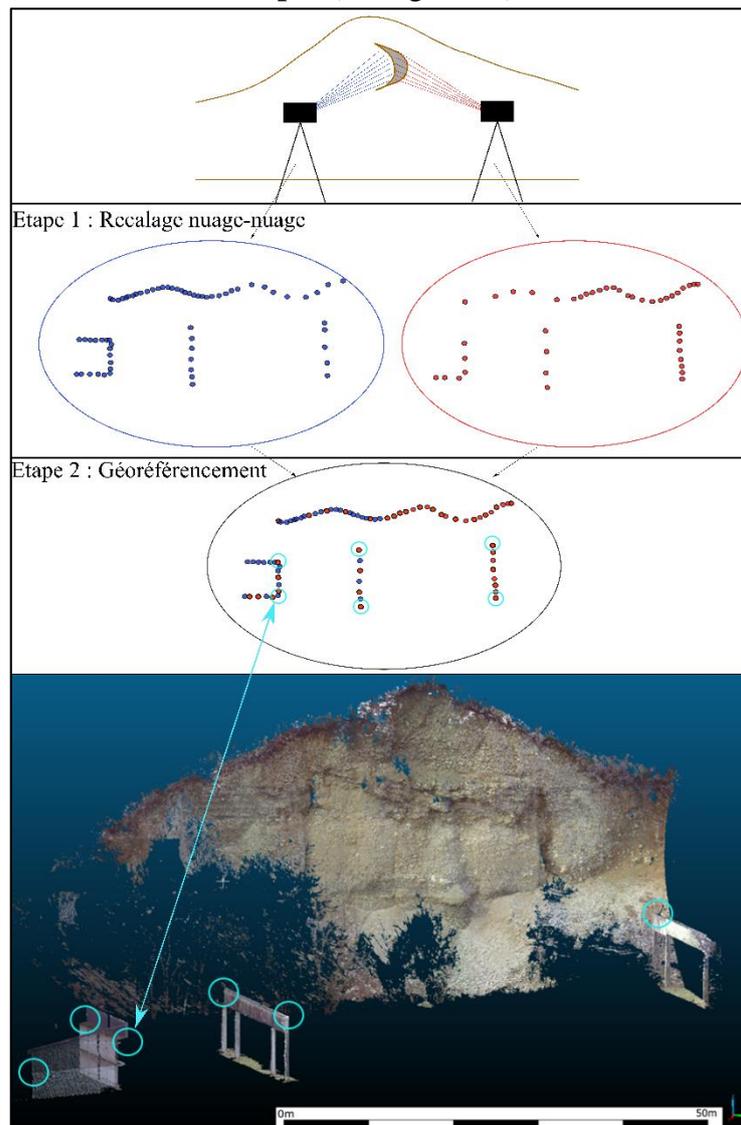


Figure 16 : Principe de recalage "nuage-nuage" et de géoréférencement avec l'utilisation de points "durs"

La première étape (cf. Figure 16) est de faire coïncider les nuages entre eux avec l'option de recalage « nuage à nuage » avec un nombre d'itérations suffisant (20 dans le cas présent), en les rapprochant au préalable pour favoriser la réalisation des itérations successives de détection de points homologues effectuées avec la méthode **ICP**<sup>8</sup>. Sans cela, le logiciel aura beaucoup de difficultés à réaliser cette étape.

La valeur **RMS**<sup>9</sup> à la suite de cette étape est **inférieure à 1 cm**, une précision très bonne pour ce type de relevé et la faible présence d'éléments commun entre les deux nuages. Cette consolidation s'effectue principalement grâce aux éléments bâtis.

Cependant, il faut faire attention à cette notion de RMS et vérifier de manière rigoureuse le recalage effectué. À plusieurs reprises, le résultat du calcul apporta une valeur RMS faible, mais les nuages n'étaient absolument pas cohérents entre eux, d'où l'étape préalable de placement manuel des nuages.

La deuxième étape (cf. Figure 16) est le **géoréférencement** du nuage de point, qui sera effectué dans le système national en vigueur. Cette étape-ci ne sera pas effectuée sur le logiciel « Scene », car les options de recalage sont uniquement de « nuage à nuage » ou « basé sur cible », étant indépendante et ne pouvant être réalisée à la suite. Les deux nuages sont déplacés, malgré la notation en « groupes fixes », et ne peuvent être assemblés en un seul. Il suffit d'exporter les deux nuages préalablement recalés entre eux (au format «. Las », «. e57 »...) pour les lire sur le logiciel utilisé ici, **CloudCompare**. Par la suite, l'assemblage du nuage en un seul est réalisé et le géoréférencement du nuage peut avoir lieu d'un seul bloc en saisissant des paires de points.

Les paires de points saisies pour le géoréférencement sont alors les **points « durs »** tels que des angles de bâtiment levés au tachéomètre (cf. Figure 16). La valeur **RMS** finale indiquée est d'environ **2 cm** avec **7 points de calage**, ce qui coïncide toujours avec les exigences de départ pour la qualité du levé. Ceci ne peut être réalisé avec des pierres relevées le long de la paroi, la photographie servant uniquement à coloriser le nuage de points. Il est alors très difficile de reconnaître les pierres levées sans photographies brutes, à l'opposé de la photogrammétrie où le géoréférencement est directement réalisé grâce à ces cibles naturelles.

---

<sup>8</sup> ICP : de l'anglais « Iterative Closest Point », cf. Glossaire

<sup>9</sup> RMS : de l'anglais « Root Mean Square », cf. Glossaire

## II.2.2 Photogrammétrie

### II.2.2.1 Acquisition des données

Il fut préalablement choisi de mettre en œuvre les techniques de photogrammétrie terrestre et aérienne. En photogrammétrie terrestre, deux méthodes sont testées : une **méthode classique** avec une prise de **photographie à main levée**, et une **méthode détournée**, effectuée d'un seul point de vue pour des acquisitions de **photographie panoramique**. De manière **aérienne**, cela sera mis en œuvre grâce à la prise de **photographie oblique** par drone. Le principe de ces méthodes est expliqué ci-dessous.

- **Photogrammétrie terrestre**
  - **Méthode classique : prise de photo « à main levée »**

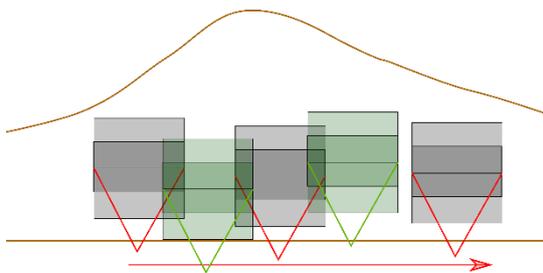


Figure 17 : Acquisition de photographie de manière classique



Figure 18 : Configuration de photogrammétrie terrestre de manière classique

La première méthode proposée est celle de l'acquisition de photogrammétrie classique avec une prise de photographies à main levée, en progressant de manière linéaire (en marchant). Elle possède l'avantage d'être **simple** de mise en œuvre pour un **coût très faible** (le prix de l'appareil photo uniquement) ainsi que sa **rapidité** d'action sur le terrain. Cependant, le **recouvrement** entre les images peut être **mal maîtrisé** puisqu'il est estimé par l'opérateur lui-même. Des bandes peuvent être oubliées (cf. Figure 17), nécessitant un retour sur le terrain, à un instant différent, et impactant le principe de mesure entre époques certaines. A contrario, le recouvrement peut être trop important, engendrant un surplus conséquent de photographies ce qui augmentera considérablement les temps de calcul par la suite. En conclusion, cette technique peut être très **efficace** pour les **falaises de faible envergure** avec la possibilité d'**acquisition à faible distance**.

Ces acquisitions sont réalisées (cf. Figure 17 et Figure 18) avec l'engagement de l'appareil photographique **Olympus E510**, d'une résolution de **10 Mpx** et d'une  **focale de 30 mm** ce qui permet d'obtenir une résolution au sol de **1,7 cm/pixel à 50 m** (cf. Annexe 3).

- **Méthode détournée : de manière « Panoramique »**

Après avoir eu une discussion auprès de M. **B. Cannelle**, professeur de photogrammétrie à la **HEIG-VD**, ce dernier nous a aimablement conseillé et autorisé l'utilisation de leur matériel photographique, et du système de « **bras motorisé** ». Cet outil est avant tout dédié à une utilisation purement photographique, pour la réalisation de **panorama** principalement.

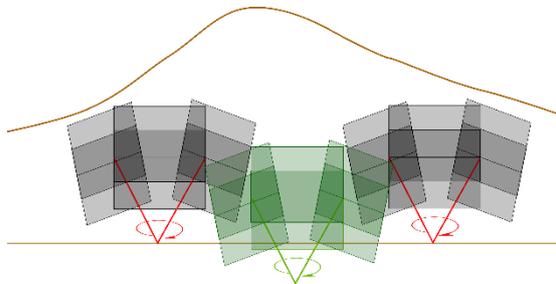


Figure 20 : Acquisition de photographie d'un seul point de vue

Figure 19 : Configuration de photogrammétrie terrestre en mode "Panoramique"



La deuxième méthode proposée est donc l'**acquisition de manière panoramique**. Sa mise en œuvre est aussi très **simple** : un bras motorisé et l'appareil photographique sont montés sur trépied. Une interface permettant le paramétrage du recouvrement et de l'emprise de la zone apparaît sur téléphone, tablette ou ordinateur. Après coup, il faut simplement laisser se faire l'acquisition, avec un œil attentif sur les photographies en cours de prises pour ne pas avoir d'images floues, ou de mauvaise mise au point.

Son avantage premier est un **recouvrement automatisé** et **maitrisé** de la zone (cf. Figure 20), très utile pour des **acquisitions à longue distance** et des **falaises de grande envergure**. Il n'y a **pas d'image en surplus** et la durée de génération du nuage de points est **optimisée**. Cependant, l'appareil doit être déplacé de manière régulière pour éviter les zones d'ombres. L'investissement de ce type de matériel est donc un réel atout pour optimiser une mission de photogrammétrie classique.

Dans le cas de la falaise de Bursins, l'appareil photographique de marque **Canon EOS5D Mark III**, d'une résolution de **22,2 Mpx** et d'une **focale de 28 mm** montés sur le **bras motorisé** de marque « **Rodéon Pixpert** » (cf. Figure 21) et trépied furent engagés.



Figure 21 : Bras motorisé Rodéon Pixpert monté sur trépied

Au total, **6** stations ont été établies (cf. Figure 19), en fonctionnant par « **paires** », décalées de quelques mètres entre elles (3 - 4 m). La résolution au sol obtenue est de **1,1 cm/pixel à 50 m**. À titre de comparaison, l'engagement de l'appareil Canon EOS 5DSR et d'une focale de 500 mm (type Tamron à focale variable 150-600 mm) à une distance de 2 km permettrait, dans des conditions idéales d'acquisition (c'est-à-dire sans tenir compte des conditions météorologiques et atmosphériques), d'obtenir une résolution au sol de 1,7 cm/pixel. Cependant de manière **classique** ou **détournée**, des **inconconvénients communs existent** avec les techniques de photogrammétrie terrestre. La végétation haute présente en pied de falaise masque le bas de celle-ci qui peut, selon les cas, être importante aux analyses des géologues. Le haut de la falaise est aussi un élément manquant dans les nuages acquis par voie terrestre. Pour remédier à ce type de problème, la photogrammétrie aérienne par drone est aussi évaluée.

- **Photogrammétrie aérienne**

L'avantage de cette technique est de pouvoir effectuer des **acquisitions entre la végétation et la falaise**, et la **partie haute**, zone absente pour les acquisitions terrestres (Figure 22). Elle est donc un très bon complément de la photographie terrestre, avec le potentiel supplémentaire d'acquérir des **zones difficiles** d'accès. De plus, la distance d'échantillonnage au sol sera réduite puisque le vol peut s'effectuer à **proximité de la paroi**, mais c'est le **nombre de photographies** et **leur emprise** au sol qui seront **moins efficaces** pour la suite des traitements.

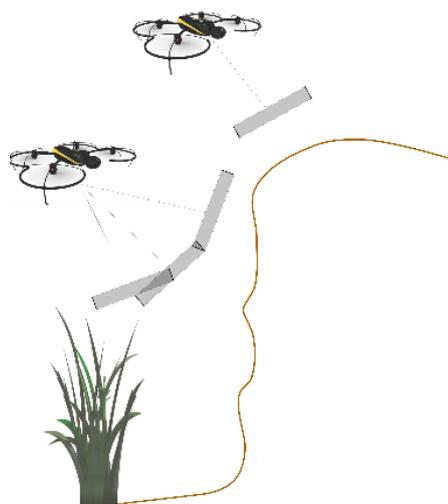


Figure 22 : Acquisition par photogrammétrie aérienne

Bien que cette technique soit un atout pour les points énumérés ci-dessus, l'implication d'un drone n'est pas utile pour chaque cas et possède aussi des **inconconvénients**. Le **pilotage** doit s'effectuer de manière **manuelle** car les parois rocheuses sont bien trop irrégulières pour laisser se faire l'acquisition automatiquement (en comparaison d'un levé de façade de bâtiment réellement linéaire, le drone pouvant ainsi conserver une distance constante à l'objet). Par conséquent, il s'agit de savoir piloter parfaitement le drone, et d'estimer soi-même du recouvrement entre les images. De plus, cet outil est **extrêmement dépendant des conditions météorologiques** telles que le vent, souvent présent le long des escarpements verticaux, et de la pluie. Il est aussi primordial de faire attention au milieu environnant, l'implication d'un drone pouvant être très dangereuse, tant pour le matériel lui-même que pour les personnes. La présence de végétation arborée ou de ligne électrique peut engendrer des défaillances de vol et la présence de route peut directement éliminer le drone des techniques à mettre en œuvre à cause d'un **danger** trop élevé.

Les acquisitions aériennes sont réalisées au drone **Albris Sensefly** avec la prise de photo oblique, de manière manuelle et non automatisée. Le recouvrement est d'autant plus difficile à estimer lors de prise de vue aérienne. La falaise de **Bursins** est un **cas idéal** pour ce type de mesures, sans danger pour les personnes et les biens, et les conditions météorologiques telles que le vent ne sont pas dérangeantes. Cet outil est équipé d'un appareil photographique de résolution **35 Mpx** et permet une résolution au sol de **1cm/pixel à 60 m**. Celle-ci sera relativement réduite étant donné la capacité du drone à effectuer des acquisitions à faible distance de la paroi.

### II.2.2.2 Génération du nuage de points

Préalablement à tous traitements, il faut utiliser un logiciel de restitution photogrammétrique, tel que **Pix4D**, disponible au sein de l'entreprise **HKD Géomatique Vaud SA**, et développé par l'**EPFL** (Lausanne, Suisse). Sur les conseils de **M. B. Cannelle** professeur à la **HEIG-VD**, pour l'utilisation d'un bras motorisé et donc des acquisitions selon la méthode « panoramique », il faudra avoir recours au logiciel **Agisoft PhotoScan**. Celui-ci est développé par **Agisoft LLC** (Saint-Pétersbourg, Russie) et possède la particularité de pouvoir « grouper » les images par station. Les deux cas seront traités ici.

- **Pix4D**

Chaque nuage de points a été généré sur le logiciel Pix4D avec des paramètres optimaux. Le **choix du paramétrage** est une étape préalable essentielle pour la détection des points homologues et la génération du nuage de points. Différents paramètres sont à renseigner, et les traitements pouvant être assez longs, il s'agit donc de définir au mieux ces derniers pour obtenir un nuage de points acceptable et complet.

Pour une densité de point élevé et un nuage constitué de peu de bruit et d'artefact, il est recommandé d'utiliser une taille d'image de **1**, une densité de point haute et un nombre minimum de correspondances supérieures à **3**, **6** étant recommandé pour les nuages à recouvrement élevé. Sur la base de ces paramètres optimaux, différents nuages de points ont été générés, à savoir ceux acquis par photographies terrestres « à main levée » et « panoramique », ainsi que par drone.

À l'aide des Annexes 4 et 6, il peut être remarqué que la génération des nuages **2,3** et **4** prend beaucoup de **temps**, ceci principalement dû à un **nombre d'images très élevé**. Le nuage **2** (cf. Figure 23) avec une densité optimale de points et un nombre de correspondances égales à **4** est généré avec énormément de points pour une durée de plus de **3 h**. Le nuage **3** (cf. Figure 24) avec une densité de points haute et un nombre de correspondances égales à **6** génère un nuage de plus de **6 millions** de points, et le **temps de traitement** par rapport au nuage précédent et presque **doublé**. Le nombre élevé de photographies (soit 340) servant à la restitution photogrammétrique impacte totalement le temps de post-traitement pour la recherche d'éléments homologues entre les images. Quant au nuage **4**, combinaison des photos acquises par voie aérienne et terrestre « à main levée », le temps de post-traitement est excessivement long, toujours dû au nombre élevé de photographies (soit 497), et ce malgré le paramétrage de la densité en « faible ».



Figure 23 : Nuage de points Albris 2018 généré sur Pix4D  
157 photos, 14 millions de points  
Cf. Nuage 2, Annexe 4 et 6



Figure 24 : Nuage de points Olympus 2018 généré sur Pix4D  
340 photos, 6 millions de points  
Cf. Nuage 3, Annexe 4 et 6

En comparaison, plusieurs nuages concernant les acquisitions effectuées avec le système « Rodéon Pixpert » furent générés sur Pix4D. Les calculs avec ce type de matériel sont extrêmement rapides : le recouvrement est totalement maîtrisé (paramétré avec **10** ou **20** %) et le nombre d'images acquises est faible (**19** pour les **6** stations effectuées au Rodéon).

Les nuages générés sous Pix4D sont cependant **impactés par l'acquisition en mode panoramique**. Le nuage **8** (cf. Figure 26) offre une densité de points très élevée avec un nombre de correspondances égal à **2**, mais présente **beaucoup de bruit et d'artefact** (cercle rouge sur la Figure 26). La durée de génération de **30 minutes** est quant à elle totalement acceptable. Les nuages **7** et **9** offre une densité de points acceptable, mais ne peuvent être considéré comme complet en comparaison des nuages **1** à **4**. Les nuages **5** et **6** (cf. Figure 25) sont véritablement incomplets malgré un nombre minimum de correspondances de **2**. Pour ces deux nuages, **seule la partie basse** de la falaise est considérée comme une zone de « correspondance » entre les images. Le faible recouvrement et un faible nombre d'images ne permettent pas la génération d'un nuage de point complet.

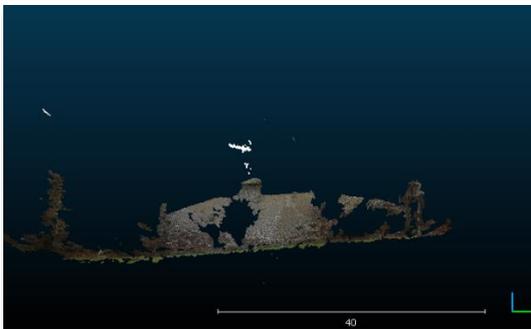


Figure 25 : Nuage de points Rodéon 2 stations généré sur Pix4D  
7 Photos, 3 millions de points  
Cf. Nuage 6, Annexe 4 et 6



Figure 26 : Nuage de points Rodéon 6 stations généré sur Pix4D  
19 Photos, 36 millions de points.  
Cf. Nuage 8, Annexe 4 et 6

Par conséquent, les nuages acquis de manière « panoramique » avec une telle configuration permettent, dans notre cas idéal et un paramétrage adapté, d'obtenir un nuage de points suffisant sur Pix4D. Cependant, pour une application en cas réel, cela ne serait peut-être pas le cas.

- **Agisoft Photoscan**

Pour remédier aux problèmes rencontrés, le logiciel Agisoft PhotoScan qui gère beaucoup mieux les configurations de type « panoramique » fut utilisé. Les photographies prises d'une seule station peuvent être « groupées », ce qui simplifie considérablement la recherche de points homologues entre les images.

À l'aide des Annexes 5 et 6, il peut être observé que les nuages **10** (cf. Figure 27) et **11** en comparaison des nuages **5** et **6** (cf. Figure 25), calculés avec **seulement deux stations**, sont beaucoup **plus complets**. En outre, il peut être pensé que le nombre de correspondances permettant la génération des éléments homologues est de **2** (en parallèle avec les paramètres sur Pix4D).

Les nuages **10** et **12** (cf. Figure 27 et Figure 28) générés avec une densité de points haute sur Agisoft apportent un point tous les **2 à 3 cm**, de manière assez régulière et homogène. Cependant, quelques trous apparaissent dans les nuages, cela provenant principalement de la mauvaise configuration géométrique des stations. Il peut être remarqué que le temps de génération de ces nuages est très faible.



Figure 27 : Nuage de points Rodéon 2 stations généré sur Agisoft  
6 Photos, 4 millions de points  
Cf. Nuage 10, Annexe 5 et 6



Figure 28 : Nuage de points Rodéon 6 stations généré sur Agisoft  
19 Photos, 6 millions de points  
Cf. Nuage 12, Annexe 5 et 6

En plus de cela, Agisoft permet le calcul de carte de profondeur<sup>10</sup> pour chaque image et utilise différents algorithmes de filtrage réduisant le bruit du nuage. Dans le cas des milieux naturels, assez complexes avec beaucoup de détail, la construction de la carte de profondeur doit être paramétrée sur Léger (« Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur - Professional Edition, Version 1.1 » 2015). Cette fonction aide à la reconstruction du nuage de points, mais peut impacter d'une dizaine de minutes le temps de traitement, ce qui est certes négligeable en comparaison des **8 heures** avec le nuage **4** (cf. Annexe 4 et 6).

- **Conclusion**

Pour résumer les éléments essentiels, concernant les **acquisitions au drone** tout d'abord, l'acquisition se fait à **proximité** de la falaise (la taille de pixel sol est donc réduite). Le **nombre de photos** est quelque peu élevé (157) et le temps de génération avec les paramètres optimaux et de **3 heures** environ, amenant à un **nuage très dense (14 millions de points)**.

Concernant les photographies terrestres réalisées de manière plus lointaine, **deux fois plus de photos** ont été acquises (340) et le **temps de traitement** est alors **doublé**. La **densité** du nuage de points est quant à elle **deux fois moins** élevée que celle du drone.

Pour les acquisitions effectuées de manière « **panoramique** », il est **difficile** d'obtenir un nuage réellement complet et correct sur **Pix4D**, quelques-uns sont tout de même utilisables, mais il est préférable de **traiter les nuages sur Agisoft**, qui offre de très bons résultats. Il est aussi important de noter qu'avec cette configuration, le **recouvrement** est **maitrisé**, et le **nombre de photos** est très **faible** ce qui apporte un **nuage de points dense** avec **peu de bruits**, utilisable en un temps extrêmement réduit.

---

<sup>10</sup> Une carte de profondeur est une image dont chaque pixel représente une hauteur Z basée les valeurs de niveaux de gris. Elle rend alors visibles les différences de hauteur relative d'un pixel à l'autre.

### II.2.2.3 Géoréférencement des nuages de points

Le **géoréférencement** des nuages de points acquis par **photogrammétrie** a été réalisé avec des visées de points sur des **pierres** nettement visibles **le long de la paroi**, ceci pour les techniques terrestres et aériennes. Le nuage de points est géoréférencé directement sur la zone à étudier, ce qui permet de **minimiser les erreurs** de calage du nuage.

Pour faciliter la recherche des points relevé une fois revenus au bureau, un tachéomètre combiné à un appareil photo (dans le cas présent, un **TS15** imagerie de marque **Leica Geosystem**) fut utilisé, ce qui permet la **prise de photo du point** venant d'être mesuré.

Il est vivement conseillé de lever un nombre conséquent de points le long de la falaise, avec une géométrie correctement distribuée pour éviter des erreurs **RMS** trop élevées (cf. Tableau 3). Selon **l'angle de prise de vue**, même si la pierre est visée de manière rigoureuse lors de la sortie terrain, des **erreurs** peuvent être commises, que cela soit dû à un mauvais pointé lors de l'acquisition ou à un mauvais pointage sur les photos (cf. Figure 29), peu importe le logiciel de restitution utilisé.

	Erreur X (cm)	Erreur Y (cm)	Erreur Z (cm)	RMS 3D (cm)
<b>9051</b>	6,6	21,5	-4,6	13,3

Tableau 3 : Résultat de l'écart X, Y, Z entre les coordonnées vraies et les celles calculées pour le pointage de l'élément de la Figure 29 sur Pix4D

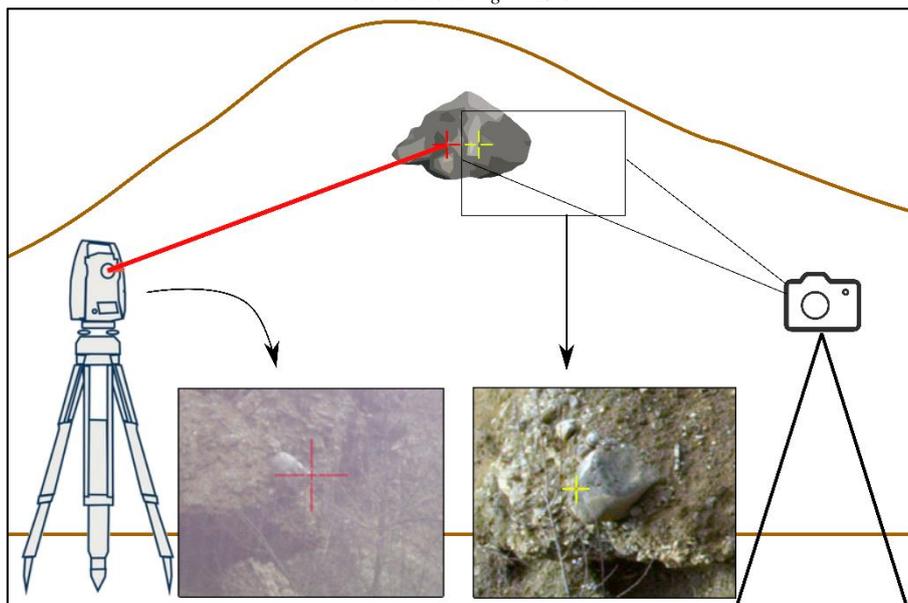


Figure 29 : Mauvais pointage d'un élément naturel sur Pix4D  
À gauche la photo issue du levé tachéométrique, à droite la photographie pointée sur Pix4D

De plus, le pointage des points relevés sur toutes les images où ces derniers sont visibles ne mène pas à un meilleur géoréférencement (cf. Figure 29). Celui-ci sera d'autant meilleur si le **pointage** était réalisé sur les **photos d'un point de vue semblable** aux visées effectuées, et éviter les erreurs comme l'exemple ci-dessus. L'utilisation du système « **Rodéon Pixpert** » est une fois de plus un atout, car le tachéomètre peut éventuellement se substituer à celui-ci pour effectuer les mesures d'un point de vue semblable aux acquisitions de photographies terrestres.

Le relevé de pierres le long de la façade fut effectué sans difficulté dans le cas présent. La géologie de type fluvio-glaciaire constituée de gravier et de blocs nettement visibles permet une visée d'éléments notables sans problème. Ce qui peut ne pas être le cas avec une pierre plus friable tel que du gypse.

### III Traitements des nuages de points

Après avoir généré les nuages de points acquis par lasergrammétrie ou photogrammétrie, de manière terrestre ou aérienne, il reste à procéder à une détection de changement entre les nuages d'époques différentes.

Plusieurs outils existent pour la mise en œuvre d'une détection d'éléments ayant chuté tel que le logiciel 3D Reshaper permettant une inspection 3D ([www.3dreshaper.com](http://www.3dreshaper.com)), ou encore le logiciel Coltop 3D de Terranum donnant lieu à une analyse de la structure géologique, et dédié expressément aux géosciences ([www.terranum.ch](http://www.terranum.ch)). Cependant, le choix final fut orienté vers un **logiciel gratuit**, CloudCompare, très souvent étudié dans le cadre de la détection de changement et de corrélation diachronique sur la base unique des nuages de points (Fadili 2015; Feldmann 2017).

#### III.1 Outils de traitement

##### III.1.1 Détection de changement : CloudCompare et l'Algorithme M3C2

Le logiciel CloudCompare développé par Daniel Girardeau-Montaut (Girardeau-Montaut 2006) permet principalement le traitement des nuages de points, de maillages triangulaires, ainsi que la comparaison directe de données tridimensionnelles. Ce dernier fut peu à peu amélioré et implémenté par différents plugins, bon nombre d'entre eux sont disponibles en téléchargement open source sur la plateforme GitHub ([www.github.com](http://www.github.com)). Il est aujourd'hui implémenté de différentes fonctions telles que l'alignement de nuages à nuage (avec l'utilisation de la méthode ICP), d'algorithme de génération de surface, ou encore de classification. Le fonctionnement de ces outils est aussi très largement documenté et n'est pas une « boîte noire<sup>11</sup> » en comparaison d'autre logiciel.

Parmi les outils permettant une détection de changement entre deux nuages de points, deux méthodes existent : la distance « **Cloud-to-Cloud** » utilisant par défaut la recherche au plus proche voisin entre le nuage de référence et le nuage comparé (Fadili 2015), et l'**algorithme M3C2** de l'anglais « Multiscale Model to Model Cloud Comparison » basé sur le calcul de la distance selon la direction normale à la surface. Cet algorithme est intégré en tant que plugin dans le logiciel CloudCompare et a été développé par Nicolas Brodu et Dimitri Lague (Brodu et Lague 2012; Lague, Brodu, et Leroux 2013).

Cette deuxième méthode permet de s'affranchir des données manquantes, des changements de densité, des nuages de points bruités, et dont la topographie du milieu peut être complexe, ce qui est notamment le cas des acquisitions en milieu naturel (Fadili 2015). L'avantage clé de cet outil est de **détecter des petits changements de surface et d'évaluer s'ils sont statistiquement significatifs** (Lague, Brodu, et Leroux 2013). De ce fait, c'est cette deuxième méthode qui sera utilisée par la suite.

---

<sup>11</sup> On parle de logiciel « boîte noire » lorsque le fonctionnement interne de celui-ci est masqué. Les processus de traitement sont méconnus tant que le logiciel ne fait l'objet d'une étude détaillée.

### III.1.1.1 Principe de calcul

La distance entre les nuages est calculée selon la meilleure direction perpendiculaire à la surface, c'est-à-dire la **direction selon la normale**, qui varie pour chaque point. Le calcul est alors optimal, car il permet de **suivre les variations 3D de la surface**, et estime, pour chaque mesure de distance, un intervalle de confiance en fonction de la rugosité du nuage de points. La présence de bruit, d'artefact et de données manquantes dans le nuage de points peut impacter la distance Cloud-to-Cloud d'erreur, or ici, aucun calcul n'est réalisé en cas de données manquantes. Le processus de l'algorithme **M3C2** est présenté ci-dessous en deux étapes (cf. Figure 30 et Figure 31).

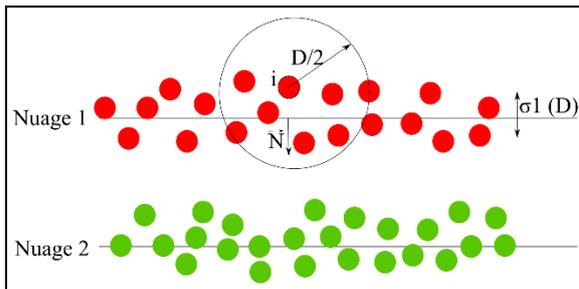


Figure 30 : 1re étape pour le calcul M3C2

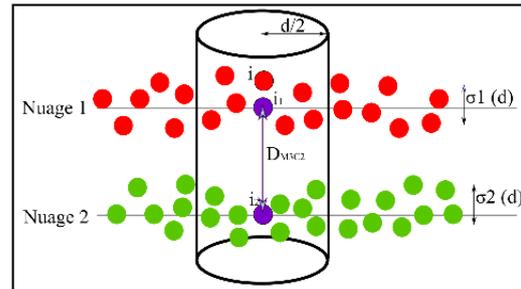


Figure 31 : 2e étape pour le calcul M3C2

- **1re Étape** (cf. Figure 30) : Pour chaque point  $i$  du nuage de référence (nuage d'époque la plus récente), sont déterminés les voisins inclus dans une sphère de **centre  $i$**  et de **rayon  $D/2$** . Un plan approchant au mieux la surface contenue dans cette sphère est alors calculée, la normale  $N$  à ce plan est ensuite déterminée. L'écart-type de la distance des  $n$  voisins par rapport au meilleur plan d'ajustement est enregistré et conservé comme une mesure de rugosité du nuage  $\sigma_1(D)$  à l'échelle  $D$  au voisinage du point  $i$  (Lague, Brodu, et Leroux 2013; Fadili 2015).

- **2e Étape** (cf. Figure 31) : Il s'agit ici d'identifier les points des deux nuages contenus dans un cylindre de **rayon  $d/2$** , de **hauteur  $h$**  et dont l'axe est confondu avec la normale précédemment calculée. Lorsque la normale est définie pour le point  $i$ , elle est utilisée pour projeter  $i$  sur chaque nuage à l'échelle  $d$ , c'est-à-dire aux positions moyennes  $i_1$  et  $i_2$  de chaque nuage à proximité. La distance  $DM_{3C2}$  est calculée entre ces deux positions apparentes  $i_1$  et  $i_2$ . Deux nouvelles valeurs sont alors calculées :  $\sigma_1(d)$  et  $\sigma_2(d)$  donnant une estimation locale de la rugosité du nuage de point.

### III.1.1.2 Application de l'algorithme

- **1re Étape : Calcul des normales dans le nuage de référence**

L'orientation des normales est très importante : non orientés du nuage de référence vers le nuage de comparaison de manière certaine, aucun changement ne sera détecté ou du moins, ils seront le résultat d'erreur.

Le premier paramètre à renseigner est le type de **modèle local** utilisé pour approximer la surface avec laquelle la normale sera calculée. La forme « **Quadric** » sera appliquée ici, s'adaptant très bien dans le cadre d'une topographie complexe. Pour la recherche des voisins au sein du nuage de référence sur lequel seront calculées les normales, il doit être spécifié le rayon équivalent à  $D/2$ . Enfin, il est possible de choisir ou non une orientation privilégiée pour le calcul des normales.

En premier lieu, l'influence des paramètres d'orientation sur la direction des normales avec **un rayon  $D/2 = 10 \text{ cm}$**  est étudié sur un nuage acquis par drone Albris en 2017.

Le nuage (cf. Figure 32) permet d'observer un calcul des normales correctement orientées, grâce à une orientation préférentielle selon « **+X** » ici. Pour une orientation optimale des normales, il sera donc conseillé d'effectuer le calcul selon un **axe préférentiel** qui dépend de l'orientation elle-même de la surface d'étude. À la suite de ce premier calcul, il est possible de réorienter celles restantes erronées (cf. Figure 33).

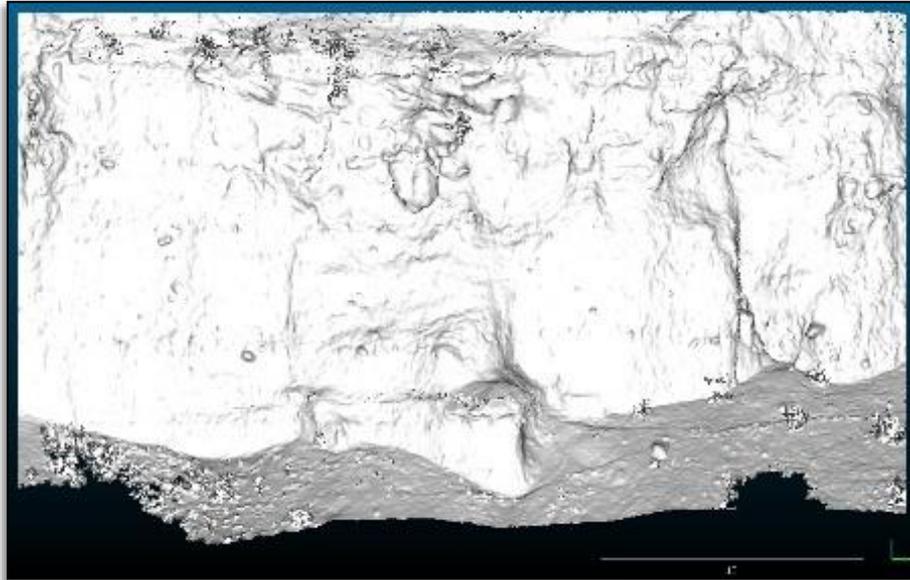


Figure 32 : Étude des normales avec une orientation préférentielle

Lors d'un **calcul des normales erronées**, celle-ci apparaissent de **couleur noire**, signe d'une orientation dans le sens inverse. Le cas a été rencontré au cours des tests lorsque le calcul est spécifié « **sans orientation** » préférentielle, ou encore avec **un nombre de voisins** en chaque point défini au préalable.

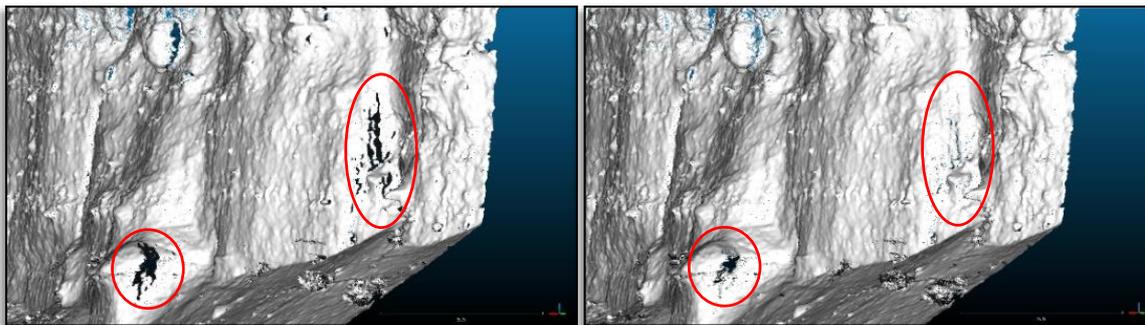


Figure 33 : Avant (à gauche) et après (à droite) réorientation des normales

L'outil « **Spanning Tree minimum** » tente de réorienter toutes les normales de manière cohérente, en partant aléatoirement d'un point puis propageant l'orientation de celle-ci. L'utilisateur doit spécifier le nombre maximum de voisins connectés à chaque nœud. Plus le nombre de voisins est élevé, plus la précision sera grande, mais davantage de mémoire et de temps de calcul seront nécessaires. L'orientation des normales (cf. Figure 33) a été améliorée sur les bords et les zones dont l'orientation, n'est pas uniquement selon « **+X** ».

Pour étudier l'impact du **paramètre  $D/2$** , le calcul fut réalisé avec différentes valeurs, les résultats avec  **$D/2=50 \text{ cm}$ ,  $10 \text{ cm}$  et  $5 \text{ cm}$**  sont présentés et effectués sur le nuage au drone Albris en 2017.

Pour une valeur  $D/2=50 \text{ cm}$ , la surface paraît extrêmement lissée et les variations locales sont négligées (cf. Figure 34). Une valeur de  $D/2$  trop grande engendre un nombre de voisins en chaque point élevé, et donc une estimation du plan de la surface très approximatif et un calcul plus long. La distance  $D_{M3C2}$  calculée par la suite sera donc imprécise.

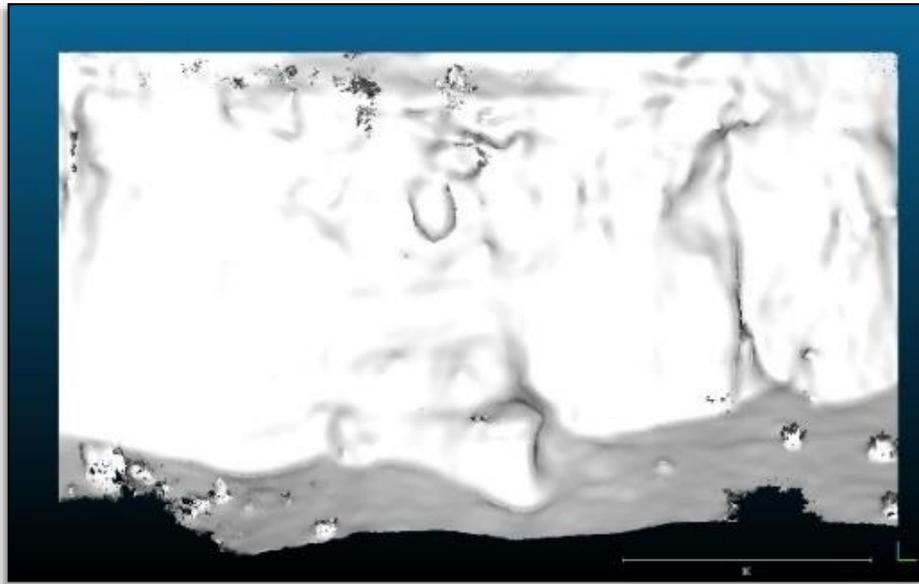


Figure 34 : Calcul des normales avec  $D/2 = 50 \text{ cm}$

Cependant, ce type de calcul s'avère utile lorsque l'objectif est de caractériser une tendance, une direction dominante pour connaître le déplacement global du lit d'une rivière par exemple (Fadili 2015).

Pour une valeur  $D/2=10 \text{ cm}$  (cf. Figure 35 à droite), les irrégularités du terrain sont encore quelque peu négligées en comparaison d'une valeur  $D/2=5 \text{ cm}$  (cf. Figure 35 au centre). Cette valeur paraît adaptée dans le cas présent, pour un nuage avec peu de bruit et de valeur aberrante.

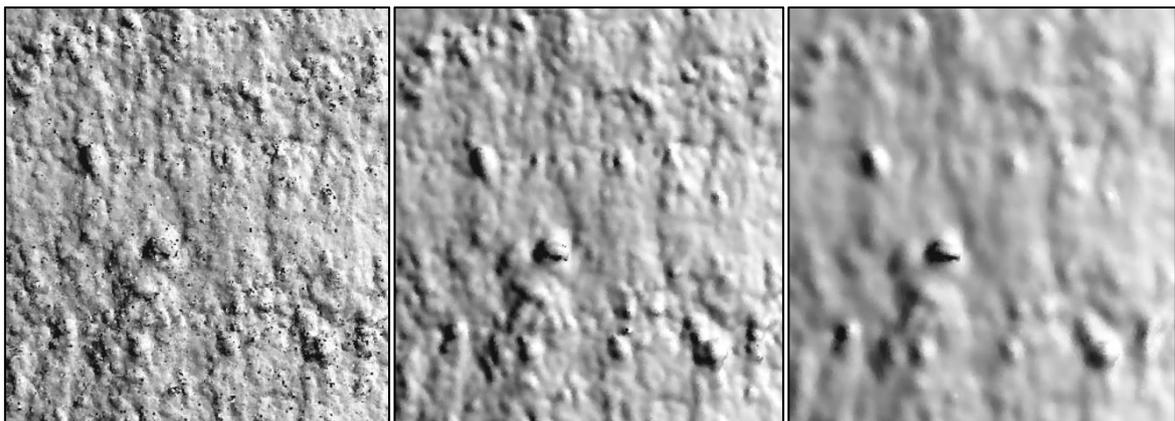


Figure 35 : Vues rapprochées de la surface avec les normales calculées.  
A gauche  $D/2=1 \text{ mm}$ , au centre  $D/2=5 \text{ cm}$  et à droite  $D/2 = 10 \text{ cm}$

En conclusion, il n'existe pas de paramétrage « unique », la valeur  $D/2$  étant dépendante de la rugosité du nuage, de l'espacement entre les points et des éléments à détecter. Si  $D$  est d'échelle similaire ou plus petite que la rugosité estimée (cf. Figure 35 à gauche avec  $D/2=1 \text{ mm}$ ), l'orientation des normales fluctuera fortement, correspondant à une surestimation de la distance entre les nuages.

A contrario, si **D** est trop élevé, la direction de la normale ne sera pas affectée par la rugosité de la surface, mais sera orientée de manière globale, ce qui sera insuffisant pour détecter de faible changement (cf. Figure 35 à droite avec  $D/2=10$  cm) (Fadili 2015). Le choix de ces paramètres est donc particulièrement important, et dépend de l'appréciation de l'utilisateur lui-même et des objectifs à atteindre.

- **2<sup>e</sup> Étape : Recherche des points dans le nuage comparé**

À cette étape, il doit être renseigné le paramètre **d/2**, rayon du cylindre pour la recherche des voisins dans le nuage de points comparé. Si le nuage est dense et possède un pas d'échantillonnage de l'ordre du cm ou moins, il est facile de choisir un diamètre **d** de projection adaptée. Dans l'autre cas, le diamètre **d** doit être plus élevé, permettant de prendre en compte les irrégularités de la surface sans négliger les zones où l'espacement est plus élevé (Brodu et Lague 2012; Fadili 2015). Pour considérer un minimum de **10 points** pour le calcul de la distance **D<sub>M3C2</sub>**, avec une distance moyenne de l'espacement entre deux points de **2 cm** environ, une valeur **d/2 =10 cm** sera utilisé pour chaque nuage.

### III.1.2 Volumétrie

Dans le cadre de ce projet, ce qui est le plus intéressant au regard des géologues, ce n'est pas le recensement des distances, mais le **volume des éléments ayant chuté** permettant d'établir des probabilités futures sur la chute des blocs. Il est donc utile de connaître ces éléments avec précision. Le calcul de volumétrie s'effectuera avec l'outil associé de CloudCompare, grâce à la génération d'une grille dont les paramètres à renseigner sont expliqués ci-dessous.

Une grille est une modélisation du terrain, composée de lignes et de colonnes distribuées régulièrement, consistant à générer des valeurs de Z en chaque nœud grâce à une méthode d'interpolation ou d'extrapolation à partir d'un pas échantillonnage. La méthode d'échantillonnage et le modèle de représentation de surface obtenue pour les calculs de volume affectent par conséquent sa qualité.

Plusieurs paramètres sont à spécifier, notamment la méthode de remplissage des cellules vides de la grille. Le meilleur choix est l'interpolation, mais la décision de prendre la hauteur minimale, maximale, moyenne, ou encore « laisser vide » est aussi disponible. Ensuite, les paramètres de la grille en elle-même doivent être spécifiés tels que le pas. Il est alors recommandé de considérer un pas correspondant à l'espacement moyen des points des nuages pour ne pas perdre les variations locales de la surface ou au contraire les surestimés.

La direction principale dans laquelle doit se réaliser le calcul doit aussi être spécifiée ainsi que la manière dont la hauteur de chaque cellule sera calculée parmi le minimum, la moyenne ou le maximum. À l'issue de ce calcul sont obtenus le volume total, la surface et le volume ajouté et enlevé. Des indicateurs de qualité sont aussi indiqués mentionnant le nombre de cellules utilisées ou le nombre de cellules restées vide (qui doit être minimisé).

### III.1.3 Explications des analyses

Dans la suite de cette étude, l'algorithme **M3C2** sera mis en œuvre, ce qui permettra d'analyser les diverses technologies expérimentées en site test à Bursins. La technique employée pour réaliser et analyser les différents calculs est expliquée ci-dessous (cf. Figure 36).

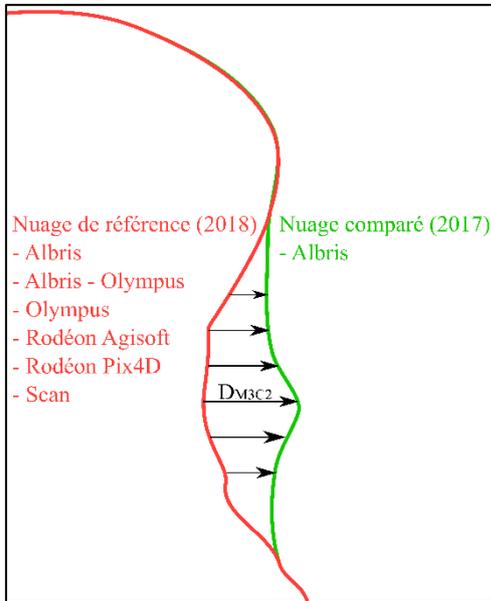


Figure 36 : Schéma des calculs M3C2 réalisés

**Étape 1** : Géoréférencement en 2017 et 2018 de chacun des nuages de points

- Variation de la distance DM3C2
- Variation du volume

**Étape 2** : Géoréférencement en 2017, puis application d'un recalage nuage-nuage pour les nuages de point de 2018

- Variation de la distance DM3C2
- Variation du volume

Pour l'étude de variation des distances, une première étude a lieu sur le nuage global préalablement nettoyé de la végétation, un second sur une zone sans changement, et enfin, sur une zone montrant un élément ayant chuté (cf. Figure 37).

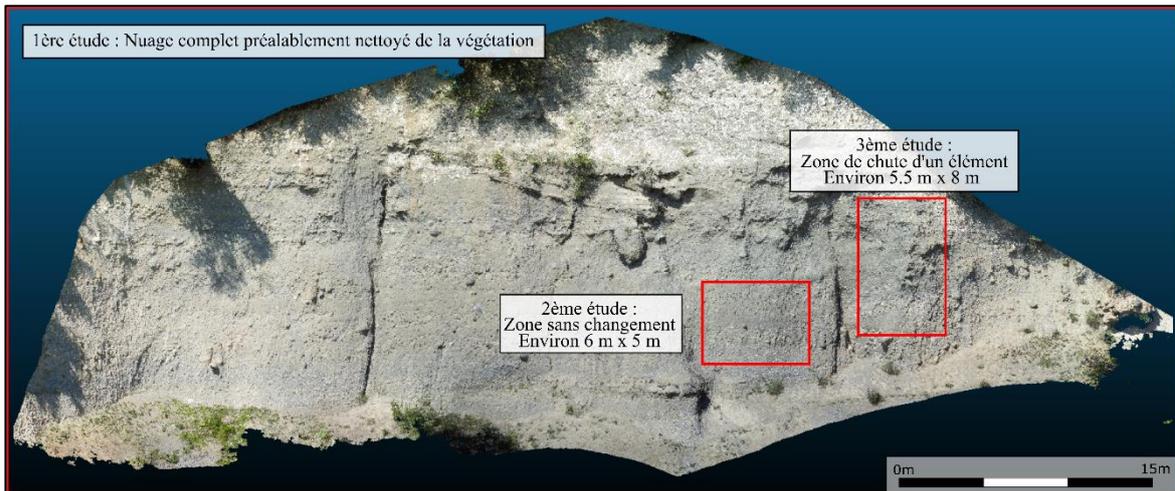


Figure 37 : Illustration des zones étudiées

Pour le calcul M3C2, il est possible d'en extraire l'histogramme de fréquence d'apparition des distances en fonction de la distance entre les nuages de 2017 et de 2018. La courbe de cette répartition peut par conséquent être réalisée, et les éléments gaussiens (moyenne et sigma) sont aussi étudiés.

Cependant, la densité de points n'est pas exactement la même dans chacun des nuages, par exemple pour les acquisitions effectuées au drone Albris (cf. Annexe 4 et 6, nuage n°2) plus de 14 millions de points à la génération. De ce fait, plus de distances sont calculées via l'algorithme M3C2 et la fréquence d'apparition des distances est plus que doublé en comparaison des autres méthodes, il est donc difficile de les comparer à juste titre de cette manière. Par conséquent, pour les études qui suivront cette valeur sera étudiée sous forme de pourcentage.

De plus, préalablement au calcul de la distance **DM3C2**, il fut calculé les normales des nuages sur la même base de paramétrage : un rayon **D/2=5 cm**, une orientation selon **+X** puis une réorientation des normales erronées. Cela n'amène pas à réaliser une comparaison précise, mais seulement à réaliser une déduction sur la fiabilité des méthodes, pour aboutir au choix d'une méthode pour son application en cas réel.

Enfin, il apparaîtra que **géoréférencer le nuage de points à chaque époque de mesure n'est pas la manière la plus optimale pour effectuer une comparaison précise**. Entre les méthodes, les distances fluctuent beaucoup, ce qui amène à un calcul inexact. De ce fait, la méthode ICP pour un recalage de nuage à nuage fin sera testée et comparée.

### III.2 Analyse via le géoréférencement

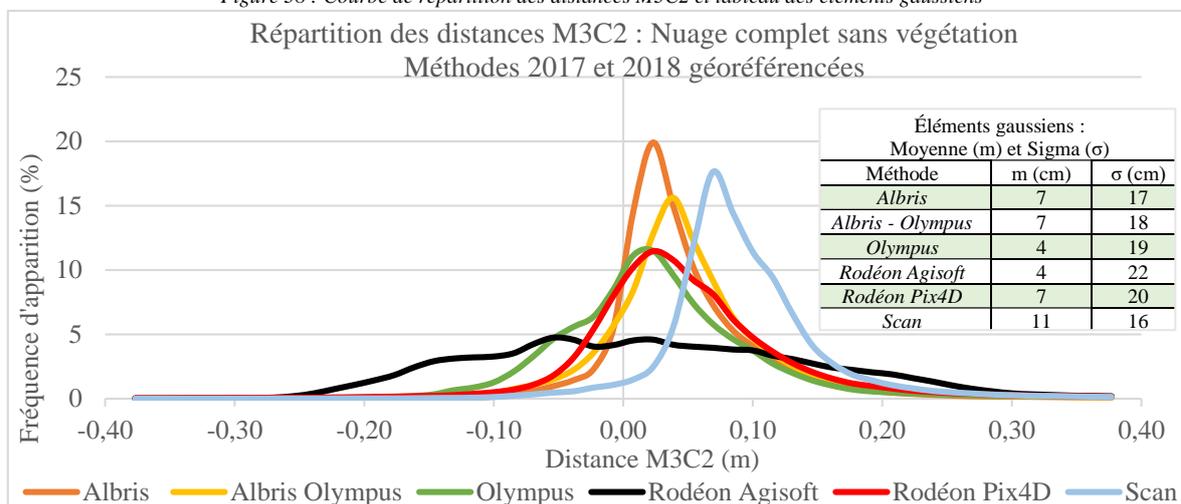
#### III.2.1 Distances M3C2 : Nuage complet nettoyé de la végétation

De manière générale, les courbes affichent à peu près la même tendance (cf. Figure 38), ce qui se retrouve sur les éléments gaussiens avec les valeurs moyennes et sigma, qui n'apportent pas de valeurs aberrantes.

Cependant, le nuage du Rodéon généré sur Agisoft ne présente pas comme les autres méthodes, de pic de maxima remarquable. La courbe est beaucoup plus étalée, ce qui est observable avec la valeur sigma la plus élevée de **22 cm**, provenant certainement d'un géoréférencement moins fin, et donc d'un calcul des distances erroné.

La courbe du scanner est quant à elle translatée par rapport aux autres méthodes. Ceci provient certainement d'un géoréférencement réalisé différemment (avec des points durs). Cependant, la valeur sigma est la plus faible (**16 cm**) et reste cohérente avec les méthodes de photogrammétrie. Sur cette base-ci, l'analyse de l'emplacement du pic maximal fut effectuée.

Figure 38 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens



Le pic maximal du scanner faro est translaté d'environ **6 cm** en comparaison des autres méthodes, mais il apparaît que le pourcentage de distances comprises dans l'intervalle de ce pic est semblable à **2 %** de celle de l'Albris en 2018 (cf. Tableau 4).

Les méthodes mises en œuvre avec l'Olympus et le Rodéon généré sur Pix4D sont identiques avec un écart de **0,1 %** pour les distances comprises dans cet intervalle. Cependant, ce pourcentage-ci est plus faible que les autres méthodes de plus de **10 %**.

Méthode 2018	Placement du pic maximal (cm)		Intervalle (cm)	Pourcentage de distance dans l'intervalle (%)
	Début	Fin		
Albris	1,5	3,1	1,5	19,4
Albris - Olympus	3,1	4,6	1,5	15,1
Olympus	1,5	2,3	0,8	5,7
Rodéon Pix4D	1,5	2,3	0,8	5,6
Scan	6,3	7,8	1,6	17,2

Tableau 4 : Placement du pic maximal d'occurrence des distances

Pour le nuage acquis par drone Albris en 2018, plus de données sont apportées avec l'acquisition du bas et du haut de la falaise. La cohérence entre les acquisitions effectuées au Rodéon sur Pix4D et à l'Olympus avec le nuage de 2017 amène à émettre l'hypothèse d'une bonne **fiabilité des méthodes**. Il est cependant difficile de faire une comparaison de ces dernières sur la totalité de la zone, l'emprise n'étant pas la même. De ce fait, la même opération est réitérée sur une zone sans mouvement.

### III.2.2 Distances M3C2 : Zone sans mouvement

Dans un premier temps, il est clairement visible sur cette zone que les courbes sont décalées entres-elles (cf. Figure 39), ce qui s'affirme à l'aide de la moyenne gaussienne dont les valeurs les plus éloignées, celle de l'Olympus et du Scan, sont espacées de **9 cm**. Cependant, les valeurs sigma ne sont pas aberrantes et restent cohérentes entres elles à **+/- 1 cm**.

Une translation de la courbe du scanner de quelques centimètres est toujours observable. Les distances sont cependant normalement distribuées pour le scanner faro dont **99,3 %** des distances sont contenues à **3  $\sigma$** .

De plus, il fut relevé que le pourcentage de distances à **1  $\sigma$**  est assez fluctuant d'une méthode à l'autre. Pour la combinaison Albris - Olympus, seulement **55,5 %** des écarts sont à **1  $\sigma$** , valeur plus faible que les **68,2 %** minimum pour une distribution gaussienne, provenant certainement de la génération d'un nuage moins dense que les autres. Cependant, il apparaît que cette courbe possède la même tendance générale que les méthodes de l'Albris et du Scan.

Concernant les données du Rodéon généré sur Pix4D, il apparaît que la tendance globale de la courbe est semblable à celle de l'Olympus. La moyenne gaussienne relevée pour l'Olympus est proche de zéro, ce qui paraît logique pour une zone sans mouvement, la valeur sigma n'est pas aberrante et les pourcentages de distances à **1  $\sigma$**  et **2  $\sigma$**  sont les plus élevés (**84 %** à **1  $\sigma$**  et **98 %** à **2  $\sigma$** ), signe d'une bonne distribution.

Enfin, il apparaît que la courbe générée sur Agisoft possède la même tendance que celle de l'Olympus et du Rodéon sur Pix4D, mais cette dernière est beaucoup plus étalée, comme précédemment, avec une valeur sigma de **4 cm** équivalente à celle du Rodéon sur Pix4D. Cette valeur est la plus élevée, mais reste cependant cohérente à **+/- 1 cm** de l'Albris et du Scan.

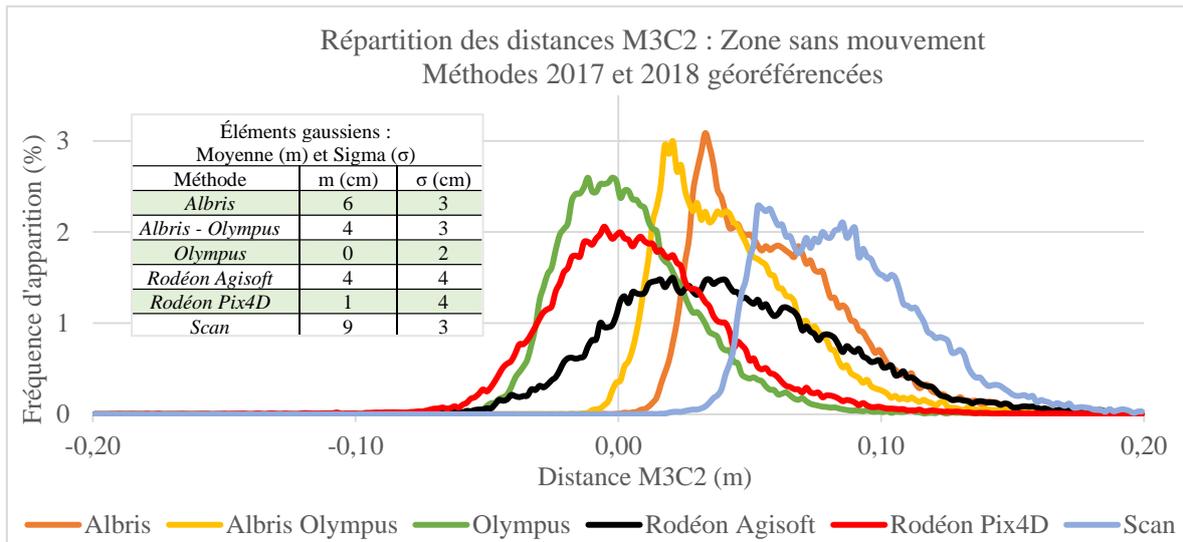


Figure 39 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens

Par conséquent, il peut être observé que les valeurs les plus cohérentes proviennent des données acquises par photogrammétrie dans le cas d'un géoréférencement sur des cibles naturelles, avec une moyenne très faible, un sigma acceptable et une distribution des écarts amplement correcte. De plus, il peut être remarqué sur cette zone sans mouvement (cf. Figure 39), que l'hypothèse d'un seuil de détection fiable peut être émise. En effet, si les courbes sont translatées chacune de leurs valeurs moyennes respectives, les distances sont globalement contenues dans l'intervalle de **-10 cm à 10 cm**.

Par conséquent, il **ne peut être considéré comme fiable les distances de 10 cm entre les nuages** (en pertes ou en accumulation).

### III.2.3 Distances M3C2 : Zone de chute de bloc

Sur cette zone où apparaît une chute de bloc assez conséquente, il peut être remarqué que les courbes ont une distribution peu semblable (cf. Figure 40). Les données acquises à l'Albris et au Scan apportent a priori plus de données sur la zone, car plus de données sont recensées ici. Cependant, les valeurs sigma ( $\sigma$ ) sont comprises entre **33 cm** et **36 cm**, il n'y a donc pas de valeurs aberrantes.

Il apparaît tout de même que la moyenne pour le Rodéon généré sur Agisoft est la plus faible avec **25 cm** et celle du scanner la plus haute avec **38 cm**. Autrement dit, **13 cm** sépare les valeurs moyennes de ces deux méthodes.

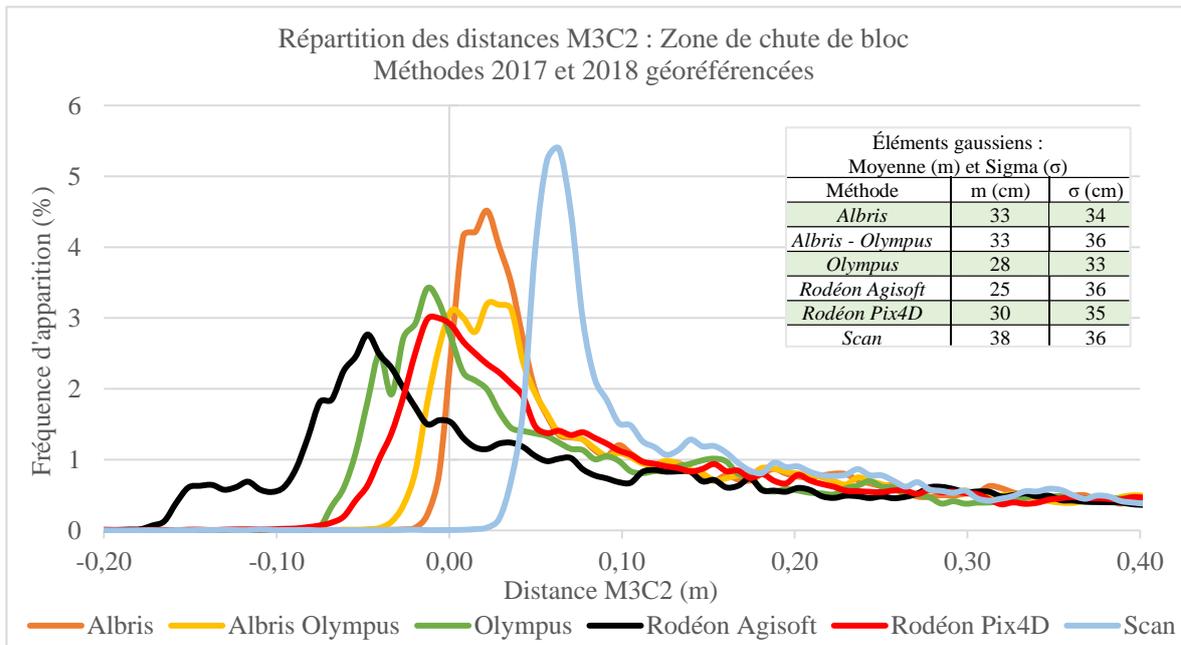


Figure 40 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens

- **Conclusion**

Ces trois premières études montrent que les distances calculées restent dans une plage d'erreur acceptable, mais varient fortement d'une méthode à l'autre.

De plus, l'hypothèse d'un seuil pour la détection de changement a pu être émise : les distances **de 0 à 10 cm entre les nuages** (en pertes ou en accumulation) ne peuvent être considérées comme fiables.

Cependant, il s'avère que les nuages seront toujours entachés d'une erreur dans le cas d'un géoréférencement, affectant le calcul de la distance **DM3C2**. La station mise en place avec une erreur de +/- **1 cm** grâce à des points de référence mesurés au GNSS à +/- **2 cm**, les points de calage servant au géoréférencement sont visés avec une erreur de +/- **2 cm**, et sans oublier la présence de bruit dans le nuage. À cela s'ajoute aussi la végétation non nettoyée qui peut subsister. Par conséquent, tout ceci engendre des variations entre les méthodes utilisées et la technique de géoréférencement pratiquée.

Pour observer de manière plus détaillée les écarts pouvant émaner du calcul de volume des éléments éboulés, des comparaisons entre les différents nuages d'une manière semblable à l'analyse de la distance **DM3C2** sont effectuées. Étant donnée une variation dans le calcul des distances, l'hypothèse d'une forte fluctuation entre les calculs de volume selon la méthode utilisée peut être émise.

Enfin, il est utile de mentionner que les nuages de points possèdent chacun une densité de points différents, mais les calculs seront réalisés sur la même base du paramétrage.

Dans les calculs de volumétrie qui suivent, il fut décidé de ne pas prendre en compte la combinaison Albris - Olympus, n'apportant pas de données supplémentaires réellement utiles.

### III.2.4 Volumétrie : Nuage complet nettoyé de la végétation

Méthode 2018	Surface (m <sup>2</sup> )	Volume ajouté (m <sup>3</sup> )	Volume enlevé (m <sup>3</sup> )	Volume total (m <sup>3</sup> )	Écart à la moyenne (m <sup>3</sup> )	Erreur (%)	Matching Cells (%)	Rapport Volume/Surface (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Albris	1245,3	16,3	-154,7	-138,4	61,8	45	92,1	0,11
Olympus	1282,8	70,9	-124,6	-53,7	22,9	43	94,6	0,04
Rodéon Agisoft	1210,9	46,5	-87,6	-41,1	35,5	86	89,5	0,03
Rodéon Pix4D	1224,2	55,9	-105,2	-49,3	27,3	55	90,5	0,04
Scan	1351,1	13,3	-113,9	-100,7	24,1	24	99,0	0,07
				<i>Moyenne</i>	-76,6			
				<i>Écart-type</i>	41,6			

Tableau 5 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les méthodes de 2018 sur le nuage complet nettoyé de la végétation

En utilisant le nuage dans sa totalité, l'emprise appliquée pour le calcul de volumétrie n'est pas la même entre les méthodes (cf. Tableau 5), ce qui ne permet pas une comparaison de manière optimale. On retrouve un rapport Volume/Surface qui **varie de 80 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>** entre le calcul effectué sur l'Albris et celui effectué sur le Rodéon Agisoft.

Les acquisitions effectuées au drone Albris en 2018 possèdent une surface beaucoup plus étendue, le drone permet l'acquisition à des endroits impossibles d'accès via le scan ou les techniques de photogrammétrie terrestre, d'où le rapport m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> plus important. De plus, cela apporte un nombre de cellules mise en correspondance de **99 %**. Ceci est une caractéristique essentielle puisqu'il faut minimiser le nombre de cellules restées vides pour un calcul optimal.

La moyenne volumique totale de toutes les méthodes est de **-76,6 m<sup>3</sup>** environ, ce qui entraîne une marge d'erreur de près de **86 %** pour le Rodéon généré sur Agisoft et de **55 %** pour le Rodéon généré sur Pix4D pour les valeurs les plus élevées. Étant donnée une fluctuation très importante, un pourcentage d'erreur ne peut être détecté de manière fiable ici. Il est donc indispensable de réitérer ce calcul de volumétrie sur une zone avec un changement notable et sur une emprise beaucoup mieux définie.

### III.2.5 Volumétrie : Zone de chute de bloc

Méthode	Surface (m <sup>2</sup> )	Volume ajouté (m <sup>3</sup> )	Volume enlevé (m <sup>3</sup> )	Volume total (m <sup>3</sup> )	Écart à la moyenne (m <sup>3</sup> )	Erreur (%)	Matching Cells (%)	Rapport Volume/Surface (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Albris	40,5	0	-12,7	-12,7	1	8	99,9	0,31
Olympus	40,5	0,3	-11	-10,7	1	9	99,9	0,26
Rodéon Agisoft	40,5	0,7	-10,2	-9,5	2,2	23	99,9	0,23
Rodéon Pix4D	40,5	0,2	-11,5	-11,3	0,4	4	99,9	0,28
Scan	40,5	0	-14,3	-14,3	2,6	18	99,9	0,35
<i>Moyenne</i>				-11,7				
<i>Écart-type</i>				1,9				

Tableau 6 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les autres méthodes sur une zone constituée d'éléments éboulés.

Dans un premier temps, la surface utilisée ici correspond à une emprise d'envergure semblable entre les méthodes (cf. Tableau 6), et le nombre de cellules laissé vide (0.1 %) est aussi égal entre toutes les méthodes.

Le volume total est beaucoup moins fluctuant que précédemment : la moyenne volumique est de **-11,7 m<sup>3</sup>**, et l'écart-type relevé passe de **42 à 2**, signe d'une meilleure répartition.

L'erreur appliquée au volume total diminue elle aussi. Seulement **4 %** d'erreur sur le volume de la zone pour Rodéon sur Pix4D contre **55%** auparavant. Le Rodéon sur Agisoft reste toujours la valeur la plus élevée avec **23 %** d'erreur sur le volume total, même si cette dernière est plus faible que précédemment, cette erreur n'est cependant pas négligeable.

La valeur avec le plus faible pourcentage d'erreur n'est pas relevée sur le scan cette fois-ci, qui est à **18 %** d'erreur de son volume total, et ce malgré un volume ajouté sur cette zone de 0 m<sup>3</sup>, comme pour l'Albris. Ce qui paraît plus cohérent pour une zone d'élément ayant chuté, qui ne doit pas contenir de volume en plus.

Le rapport Volume/Surface entre la valeur la plus faible (Rodéon Agisoft) et la plus élevée (Scan) est de **120 dm<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup>**, ce qui en fait une erreur très élevée.

Pour confirmer ces erreurs engendrées par l'imprécision du calcul de volume, une zone de plus grande envergure sera utilisée pour attester ou non de cette marge d'erreur.

### III.2.6 Volumétrie : Zone de plus grande envergure pour confirmer la marge d'erreur

Méthode	Surface (m <sup>2</sup> )	Volume ajouté (m <sup>3</sup> )	Volume enlevé (m <sup>3</sup> )	Volume total (m <sup>3</sup> )	Écart à la moyenne (m <sup>3</sup> )	Erreur (%)	Matching Cells (%)	Rapport Volume/Surface (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Albris	220,6	0,3	-18,6	-18,4	1,7	9	100,0	0.08
Olympus	220,6	1,1	-12,8	-11,7	5,0	43	100,0	0.05
Rodéon Agisoft	220,6	4,8	-16,9	-12	4,7	39	100,0	0.05
Rodéon Pix4D	220,6	1,3	-16,1	-14,8	1,9	13	100,0	0.07
Scan	220,6	0,1	-26,9	-26,7	10,0	37	100,0	0.12
<i>Moyenne</i>				-16,7				
<i>Écart-type</i>				6,2				

Tableau 7 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les méthodes de 2018 sur une zone de plus grande envergure

De même que précédemment, la surface d'emprise et le nombre de cellules laissées vides (**0** %) sont équivalents entre toutes les méthodes (cf. Tableau 7). Le pourcentage d'erreur relevé pour l'Olympus, le Rodéon sur Agisoft et le Scan est très élevé ici.

Cependant, le pourcentage d'erreur relevé pour l'Albris est semblable à **1** % du calcul précédent, et le Rodéon sur Pix4D affiche une erreur de **13** %, plus élevé que les **4** % relevé sur la zone précédente.

Le rapport m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> entre la valeur la plus faible (Rodéon Agisoft et Olympus) et la plus élevée (Scan) est de **70 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>**. Cette valeur est moins élevée que précédemment, mais reste cependant beaucoup trop haute.

- **Conclusion**

Il a été remarqué qu'émettre **un seuil d'erreur est très difficile** de cette manière, que cela soit en termes de **distances DM3C2** ou de **volumétrie**. Ces éléments varient beaucoup trop d'une méthode à l'autre.

L'hypothèse qui peut être émise ici est que ces **importantes variations** proviennent du **géoréférencement** effectué à chaque époque de mesures, ce qui ne permet pas de faire une comparaison entre les nuages de manière certaine. De ce fait, il fut décidé de mettre en œuvre la **méthode ICP**, aussi appelé méthode de recalage de « nuage à nuage », pour confirmer cette idée.

### III.3 Analyse via la méthode ICP

C'est sur les conseils de M. A. Mancini de la HEIG-VD qu'il fut décidé de mettre en pratique le recalage **ICP**. Cette méthode est employée sur divers logiciels et notamment par le logiciel CloudCompare.

La technique de recalage de « nuage à nuage » est aussi appelée méthode **ICP** qui, par des itérations successives, permet d'aligner un nuage sur un autre, servant de référence. Pour mettre en œuvre cette méthode, les deux principales hypothèses suivantes doivent être valables : les deux nuages sont recalés à peu près, et ils doivent représenter le même objet ou posséder au moins la même forme.

La méthode **ICP** est plus robuste qu'un simple alignement par paires de points sélectionnées manuellement, et dont la valeur **RMS** est calculée seulement sur ceux-ci. Elle permet le calcul d'un **RMS** global, à l'aide de toutes les paires de points homologues mis en correspondance entre les deux nuages, permettant une meilleure appréciation de la qualité du géoréférencement. Ces étapes peuvent aussi être effectuées l'une à la suite de l'autre pour effectuer un recalage préalable, puis un recalage fin.

Concernant les paramètres principaux, il est à définir soit le nombre d'itérations successives (par défaut 20), soit la différence **RMS** entre chaque itération successive (par défaut 1 e-5). Plus le nombre d'itérations est grand, ou plus la différence RMS est faible, plus le calcul lié à la convergence sera long, mais le résultat s'avérera plus fin. Il est aussi possible de contraindre l'alignement selon un seul axe. Dans le cas où les nuages ne représentent pas exactement le même objet, ou que les nuages sont bruités, l'activation du paramètre de retrait du point le plus éloigné peut s'avérer utile : à chaque itération seront supprimés les points des nuages dont les données sont trop éloignées des nuages modèles.

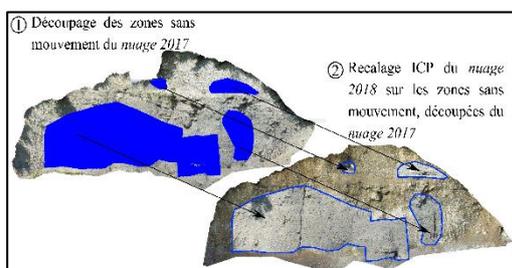


Figure 41 : Illustration de la méthode ICP

Il s'agit tout d'abord de nettoyer de manière rigoureuse les zones de végétation du nuage de référence (soit 2017 ici). Ensuite, ne conserver que les zones sans mouvement du nuage de référence (2017) sur lequel viendra se chevaucher le nuage d'époque postérieure (2018) (cf. Figure 41). Il s'agit dans le cas présent de supprimer les zones constituées d'éléments ayant chuté, pouvant induire en erreur le recalage de nuage à nuage.

Tableau 8 : Résultats des valeurs RMS concernant le recalage ICP pour chacune des méthodes

Méthode 2018	RMS ICP (cm)
<i>Albris</i>	2,7
<i>Albris-Olympus</i>	2,9
<i>Olympus</i>	2,9
<i>Rodéon Agisoft</i>	2,8
<i>Rodéon Pix4D</i>	2,8
<i>Scan</i>	2,7
<b>Moyenne</b>	<b>2,8</b>

La valeur RMS moyenne est de **2,8 cm** environ (cf. Tableau 8), calculés sur **50 000 points**, ce qui est acceptable dans le cas présent. L'erreur la plus faible étant pour l'Albris, étant donnée une emprise semblable avec des acquisitions du bas et du haut de la falaise, et une densité de points très élevée. La valeur la plus élevée étant pour le nuage de l'Olympus, plus de points et une plage de bruit plus élevé. De plus, il fut remarqué que le recouvrement « overlap » avec une valeur faible (par exemple 10 %) permet un recalage de meilleure qualité qu'une valeur élevée.

Après avoir étudié les réglages optimaux à utiliser pour le recalage ICP, l'algorithme M3C2 est mis en œuvre de la même manière que précédemment, ainsi que sur les mêmes zones.

### III.3.1 Distances M3C2 : Nuage complet nettoyé de la végétation

Grâce à la mise en œuvre de la méthode ICP, les courbes sont parfaitement superposées, ce qui est affirmé avec les valeurs des moyennes gaussiennes. En comparaison avec l'étude via le géoréférencement (cf. Figure 42), la moyenne gaussienne varie ici au plus de **2 cm** entre la valeur minimum et maximum, qui était auparavant de **7 cm** entre la valeur la plus basse, de l'Olympus et du Rodéon sur Agisoft, et la plus haute pour le Scan.

La valeur sigma la plus haute est émise pour le Rodéon Pix4D, ce qui est étonnant, car les valeurs sigma les plus hautes étaient auparavant relevées pour le Rodéon Agisoft. Cependant, il a été montré que le nuage généré au Rodéon sur Pix4D engendre plus d'artefacts que celui généré sur Agisoft. De plus, les erreurs dues au géoréférencement n'ont plus lieu cette fois-ci, il est donc normal d'observer de meilleurs résultats.

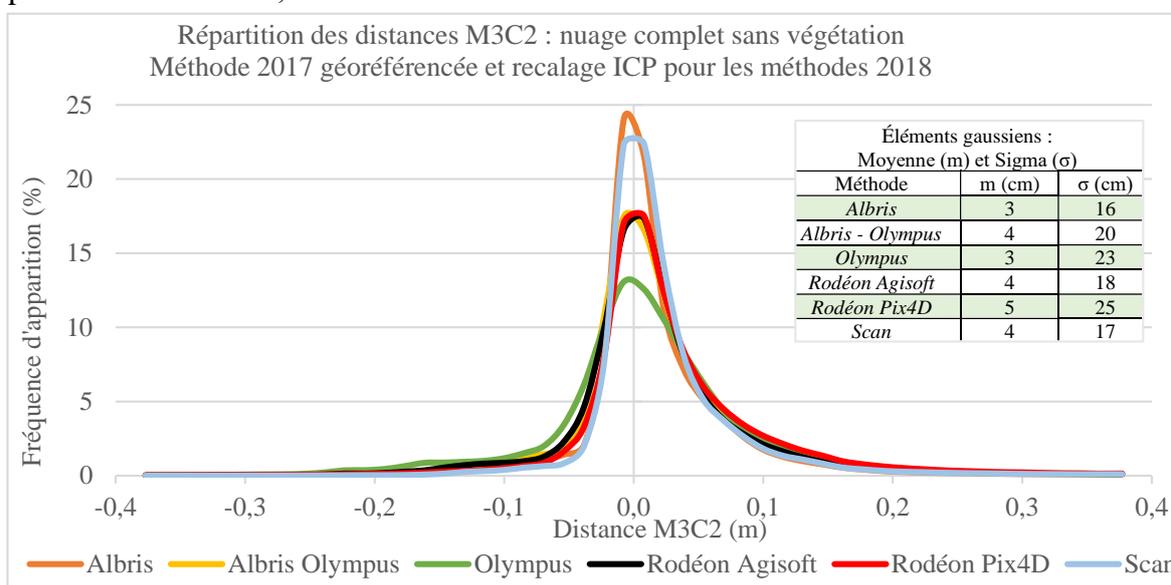


Figure 42 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens

Comme précédemment, l'emplacement du pic maximal peut être étudié (cf. Tableau 9). Cette fois-ci tous les pics sont superposés d'une meilleure manière que précédemment, se trouvant tous dans l'intervalle de -1,5 cm à 1,5 cm. De même, les valeurs de pourcentage de distance dans cet intervalle sont aussi un peu plus rapprochées : 13 % pour l'Olympus et au maximum 23 % pour l'Albris, l'écart précédent entre ces deux méthodes était de 13 %. Les méthodes de l'Albris et de l'Olympus combinées, du Rodéon Agisoft et Pix4D ainsi que le scan sont très semblable avec un pourcentage de distance présente au sein du pic de 17 %.

Tableau 9 : Analyse détaillée des histogrammes de fréquence d'apparition des distances à l'aide du pic maximal – Zone complète

Méthode	Placement du pic maximal (cm)		Intervalle (cm)	Distance dans l'intervalle (%)
	Début	Fin		
Albris	0	1,5	1,5	23
Albris - Olympus	0	1,5	1,5	17
Olympus	0	1,5	1,5	13
Rodéon Agisoft	-1,5	0	1,5	17
Rodéon Pix4D	-1,5	0	1,5	17
Scan	-1,5	0	1,5	17

Il apparaît donc que la méthode **ICP** amène à des résultats plus cohérents entre eux. Par conséquent, un seuil de fiabilité de calcul peut certainement être détecté ici, de manière plus optimale cependant.

### III.3.2 Distances M3C2 : Zone sans mouvement

Dans un premier, temps, il apparaît (cf. Figure 43) que les courbes se superposent toujours d'une meilleure manière que dans le cas d'un géoréférencement classique à chaque époque.

Les moyennes gaussiennes des distances calculées sont quasiment identiques. Celle de l'Albris diffère de **1 cm**, mais ceci est négligeable en vertu des résultats étudiés auparavant qui étaient compris dans un intervalle de **0 à 9 cm**.

Les valeurs sigma sont aussi identiques et ne fluctue plus, hormis pour le Rodéon généré sur Pix4D. Comme expliqué précédemment, cette petite dispersion provient certainement de la qualité du nuage puisqu'en effet, le calcul sous Pix4D produit un nuage acceptable, mais qui contient quelques artefacts.

Enfin, il peut être remarqué sur cette zone avec peu de changement que les courbes sont positionnées dans **un intervalle certain de -10 cm à + 10 cm**, sans translation de celle-ci, seuil dont l'hypothèse fut émise précédemment.

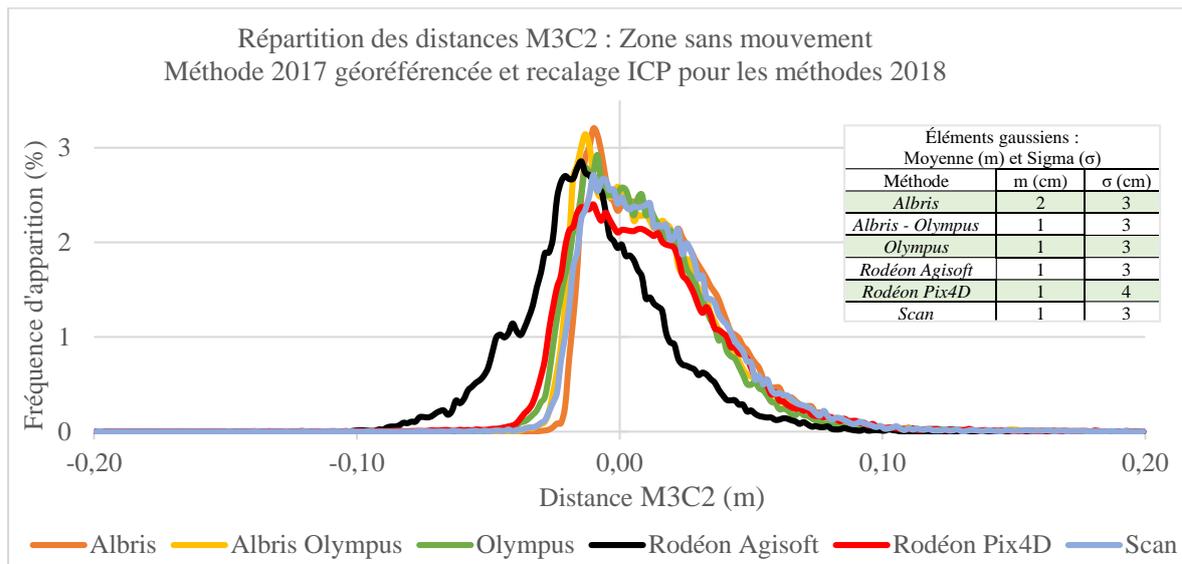


Figure 43 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens

En conclusion, ce seuil peut être appliqué de manière certaine avec la méthode **ICP**. Il apparaît aussi que la quasi-totalité des valeurs se situe à moins de **3  $\sigma$**  de la moyenne, avec **97,4 %** des distances pour l'Olympus, et jusqu'à **99,3 %** pour le Rodéon Agisoft.

De même, on retrouve que pour toutes les méthodes, hormis pour l'Olympus qui possède **64,2 %** des valeurs à un **1  $\sigma$**  de la moyenne, toutes les autres sont supérieures au **68,2 %** attendue d'une distribution normale.

Pour finir sur l'étude des distances **DM3C2** via la méthode **ICP**, il reste à observer leur distribution sur une zone de chute d'un élément.

### III.3.3 Distances M3C2 : Zone de chute de bloc

Pour cette dernière comparaison sur une zone de chute de bloc, il est encore mis en évidence une superposition toujours bien meilleure des courbes (cf. Figure 44). De plus, les valeurs des moyennes gaussiennes relevées sur cette zone se voient être plus stables. L'écart des valeurs minimum et maximum passant de **13 cm** avec géoréférencement aux deux époques à **2 cm** ici avec la méthode **ICP**. Les valeurs de dispersion des distances ont quant à elle très peu varié.

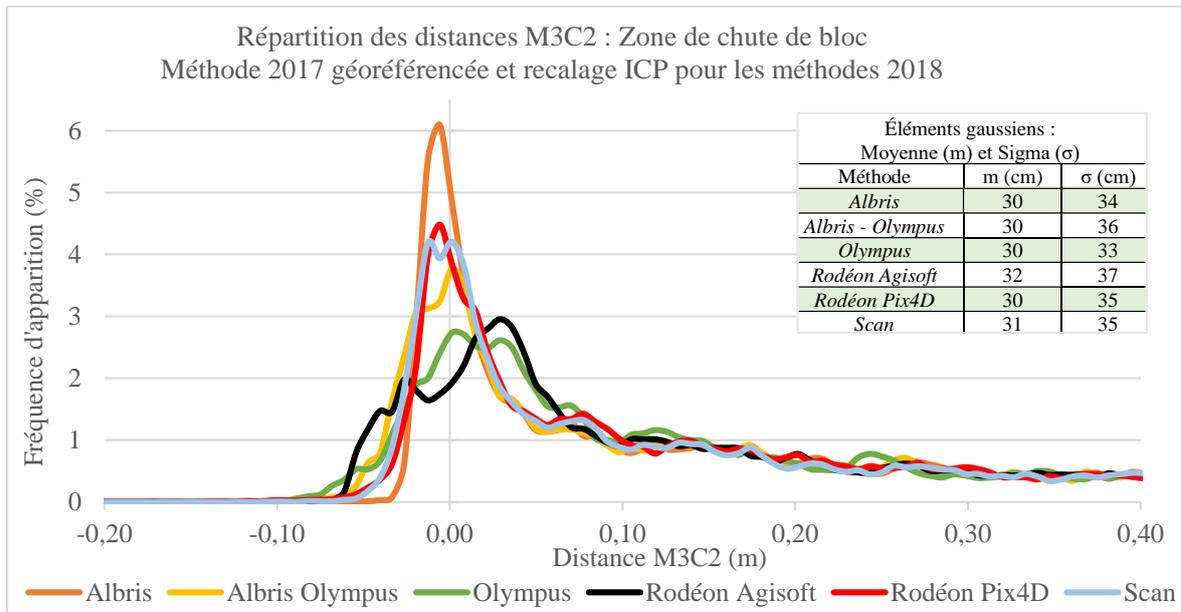


Figure 44 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens

En conclusion de ces tests, il s'avère que l'analyse des distances **DM3C2** grâce à la méthode **ICP** est **beaucoup moins fluctuante** entre les méthodes. Les calculs de volumétrie devraient donc être améliorés, ne présentant plus autant de variations que précédemment. Par conséquent, il s'agit désormais de comparer le volume d'un élément ayant chuté entre la méthode via le géoréférencement, et via la méthode ICP.

### III.3.4 Volumétrie : Comparaison géoréférencement et ICP

La zone étudiée ici est la même que celle intervenant dans le deuxième calcul de volumétrie dans le cas du géoréférencement, avec en plus, la prise en compte des données de l'Albris et de l'Olympus combinées.

Il apparaît très clairement (cf. Figure 45 et Figure 46) que le calcul de volume réalisé avec la méthode **ICP** est beaucoup moins fluctuant. En effectuant un géoréférencement à chaque époque, des écarts à la moyenne jusqu'à **2,6 m<sup>3</sup>** apparaissent avec la méthode du Rodéon sur Agisoft. Une fois la méthode **ICP** réalisée, les écarts à la moyenne sont beaucoup plus faibles, seules les acquisitions effectuées par photogrammétrie aérienne au drone Albris varient très peu entre le géoréférencement et la méthode ICP (**1 %**). Ceci provenant sûrement d'un nuage plus dense que les autres ce qui n'entraîne pas une fluctuation importante entre les deux méthodes.

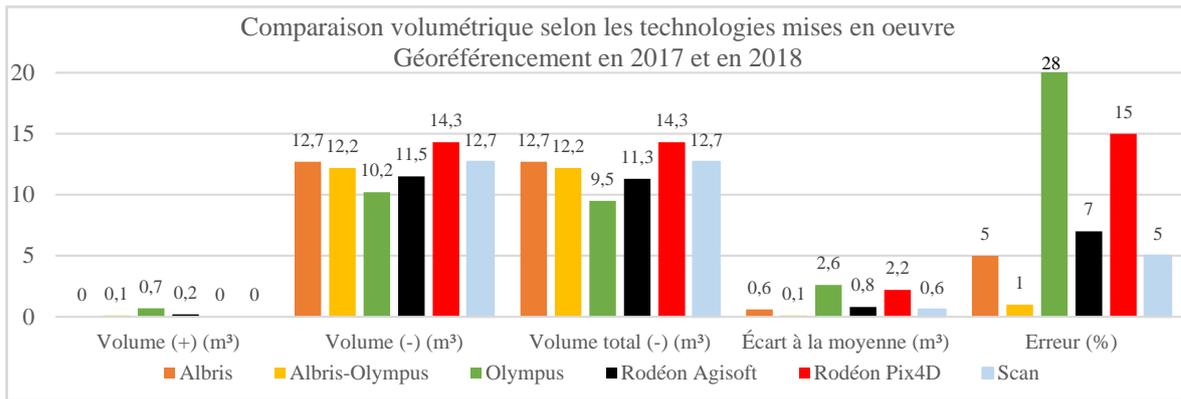


Figure 45 : Analyse de la volumétrie - Géoréférencement en 2017 et 2018

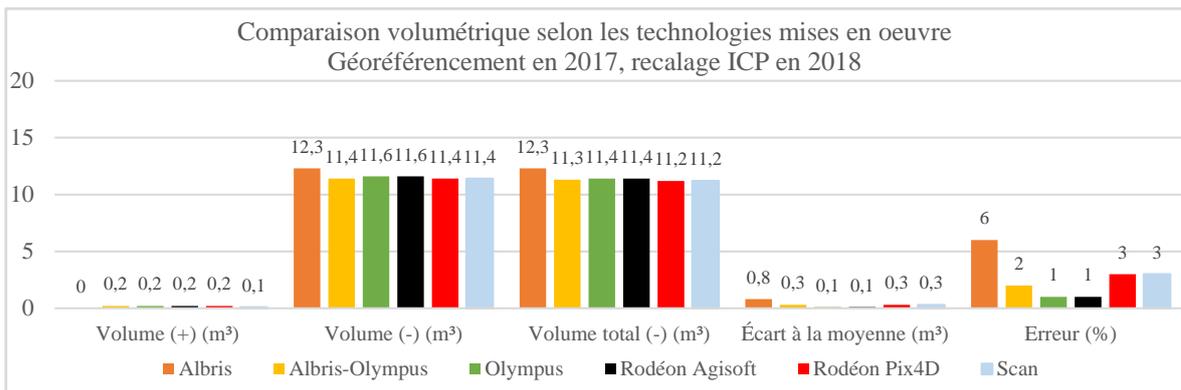


Figure 46 : Analyse de la volumétrie - Géoréférencement en 2017 et ICP en 2018

Par conséquent, la **robustesse de la méthode ICP** peut encore une fois être attestée, ce qui permet d'obtenir des écarts beaucoup moins importants. Cette méthode simple et relativement fiable est donc validée.

### III.4 Validation de l'outil et de la méthode

À l'issue de ces tests, il fut remarqué dans un premier temps qu'un **géoréférencement à chaque époque ne permet pas de réaliser des calculs fiables**, il est donc préférable d'effectuer un recalage ICP, plus simple de mise en œuvre, pour les nuages acquis à une époque autre. Il apparaît que les résultats du **Rodéon généré sur Agisoft sont améliorés avec la méthode ICP**, car le géoréférencement réalisé était moins fin que les autres méthodes.

Par conséquent, il fut décidé de mettre à l'épreuve une méthode en cas réel pour valider la simplicité de mise en œuvre. Avec la méthode ICP, il s'avère que les méthodes sont équivalentes, mais **l'utilisation de la photogrammétrie à l'aide d'un bras robotisé** se démarque des autres. Les résultats sont corrects et la mise en œuvre est très simple.

Par rapport au **cahier des charges** émis au début de ce rapport, il s'avère qu'un tel outil peut être utilisé sans inconvénient par une personne non professionnel. De plus, si un protocole de prise de photos est établi, et que l'acquisition se fait d'une manière équivalente à chaque époque, aucun problème pour la restitution photogramétrique ne sera a priori relevé.

Dans la partie suivante, cette technique de photogrammétrie « détournée » est mise à l'épreuve, avec une technique de géoréférencement différente, ne pouvant être expérimentée à Bursins, un cas beaucoup trop « idéal ».

## IV Application en cas réel

### IV.1 Présentation du site

Au vu des résultats satisfaisants obtenus avec l'utilisation du bras motorisé « Rodéon Pixpert » permettant un recouvrement automatisé et maîtrisé entre les images d'une même station, celui-ci est mis à l'épreuve sur un site représentatif d'un cas « réel » : le site d'Ollon (cf. Annexe 1, Site 7). Un phénomène très récent de glissement de terrain, de coulées de boue et de chutes de pierres a eu lieu le 21 Janvier 2018 (cf. Figure 47 et Figure 48).

Pour décrire succinctement le phénomène, celui-ci a eu lieu dans un versant forestier et rocheux en très forte pente (45 °) sur une longueur de **120 m** environ, **10 m** de largeur et sur une profondeur de **0 à 1,50 m**. Un dépôt de **1 500 m<sup>3</sup>** composé de terre végétale et de gypse altéré a enseveli la route de Verschiez, endommageant vignes et murets, totalement emportés en aval. Le déclenchement eut lieu lors de fortes précipitations, et ceci malgré un substratum de type gypse très drainant.

La dangerosité du site est par conséquent élevée et il y a un risque critique de réactivation des aléas de type chute de pierre et blocs en bordure des niches d'arrachement, ainsi qu'aux autres points de concentration de ruissellement. Cependant, il n'y a pas de menace directe pour les habitations en contrebas, mais le risque est élevé pour la réouverture de la route de Verschiez. Le glissement a mis la roche totalement à nu, ce qui provoque une érosion et une probabilité de chute plus élevée.



Figure 47 : Photographies d'illustration du glissement d'Ollon

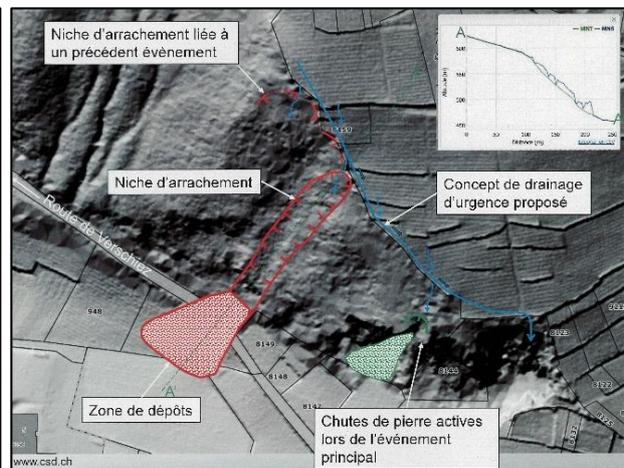


Figure 48 : Plan de situation réalisé par le bureau CSD Ingénieurs, Constat de situation de danger réalisé le 22 Janvier 2018, Dario Carrea et Renaud Chantry.

Après avoir étudié le site et ses caractéristiques, l'acquisition eut lieu. Un choix stratégique des emplacements du Rodéon Pixpert et des stations libres effectuées au tachéomètre fut réalisé, et le géoréférencement du nuage de points aura lieu avec l'aide des éléments présents sur le site.

## IV.2 Préparation et acquisition des données

Une nouvelle méthode a été expérimentée ici, impliquant le géoréférencement des acquisitions grâce aux éléments bâtis situés dans la direction opposée de la zone à étudier.

Un test de configuration  $360^\circ$  avec un recouvrement de  $30\%$  entre les images, depuis 7 stations disposées selon une configuration semblable à celle de Bursins (cf. Figure 49) est adoptée. Les emplacements des stations Rodéon sont matérialisés par des clous, levés aux GNSS, et servent de références pour les deux stations libres réalisées au tachéomètre. Les acquisitions photogrammétriques sont réalisées par « paires » permettant d'acquérir, d'un côté la partie « **falaise** » (Stations Rodéon 1 et 2, cf. Figure 49), d'un autre la partie « **glissement** » (Stations Rodéon 3 et 4, cf. Figure 49) et enfin 3 stations plus éloignées seront réalisées pour l'acquisition des deux éléments simultanément (Stations Rodéon 5, 6 et 7, cf. Figure 49).

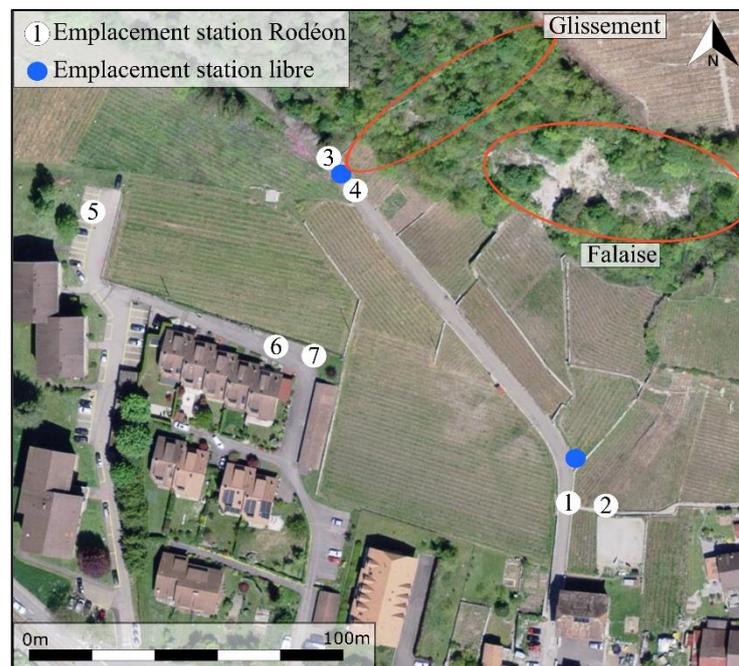


Figure 49 : Configuration des stations effectuées à Ollon

Pour ce faire, il fut choisi d'utiliser l'appareil **Canon EOS 5DSR** d'une résolution de **50,4 Mpx**, associé à une focale de **28 mm** ce qui permet d'obtenir une distance d'échantillonnage au sol de **3 cm/pixel** environ, aux emplacements 5, 6 et 7, selon la distance inclinée (environ 180 m) au point le plus haut du glissement et de la falaise.

Des contrôles seront effectués sur la falaise et le glissement. Si l'aérotriangulation des images est cohérente, le géoréférencement d'un seul côté devrait produire une erreur systématique du même ordre dans la direction opposée de l'endroit géoréférencé.

Cette configuration s'avère pratique pour des acquisitions simples et rapides (aucune cible artificielle n'est nécessaire), et dans le cas où la prise de points le long de la paroi rocheuse devient difficilement exploitable. La formation géologique de gypse présente sur les lieux permet très difficilement de réaliser des mesures sur des éléments naturels remarquables. La roche est claire est présente peu d'irrégularité ou de pierre nettement visible, et stationnée en pied du glissement, il est alors difficile de lever un point en haut de ce dernier. Finalement, une cinquantaine de points ont été relevés dans l'environnement bâti, une vingtaine le long du glissement et une dizaine pour la falaise.

### IV.3 Génération du nuage de points

- **Pix4D**

En premier lieu, la restitution photogrammétrique a été réalisée sur le logiciel Pix4D, en utilisant la configuration « **360 °** » comme prévu. Cependant, faire correspondre les photographies d'une même station est très laborieux. Il ne peut être spécifié, comme sur le logiciel Agisoft, de grouper les photographies d'une même station, bien qu'en intégrant la géolocalisation de ces dernières. Cela n'augmente en aucun cas la qualité de la configuration géométrique des photographies, au contraire, plus de photos sont rejetées du calcul.

Cependant, il fut remarqué que les zones par portion de **180 °** (partie bâtie ou partie rocheuse) obtiennent une configuration plus cohérente des photos entres-elles. Après ces premiers résultats, uniquement les photographies du glissement et de la falaise furent conservées, le géoréférencement ne pourra donc pas être réalisé avec l'espace bâti. Celui-ci doit être réalisé avec les visées sur cibles naturelles, la valeur **RMS** sera certainement très élevée étant donné un pointé difficile sur des cibles naturelles.

Il a fallu, dans le cas présent, utiliser les paramètres personnalisés dans le processus initial en prenant en considération **l'heure de prise de vue des photos** et **l'utilisation de point d'ancrages manuels** pour lier les photos d'une même station et ainsi contraindre les correspondances (22 images alignées sur les 42 avec une utilisation de 70 points d'ancrage manuel).

Le marquage manuel des points prend beaucoup de temps, bien que le nombre de photos ne soit pas excessivement élevé. Dans un cas où le nombre de photos serait plus conséquent, il serait fastidieux de marquer soi-même deux points manuels pour chaque paire de photos, d'autant plus que cela n'est pas sûr d'aboutir à de bons résultats.

Après génération du nuage de points sur Pix4D, qui fût tout de même assez long et fastidieux, il s'avère que la partie glissement est complète, présentant peu de bruit et d'artefact, mais la partie falaise, à l'inverse, est incomplète et contient beaucoup d'artefacts. La même méthodologie est donc testée sur le logiciel Agisoft.

- **Agisoft**

La restitution photogrammétrique se voit être simplifiée avec le **groupement des photos par stations**. La géométrie selon un angle de **360 °** est tout à fait cohérente, prise depuis les 7 stations, ce qui permet d'appliquer le géoréférencement du côté bâti, avec des contrôles sur la partie falaise et sur le glissement. Le nuage est géoréférencé globalement, de l'ordre du mètre, avec la mesure des emplacements des stations photographiques. A l'issue du traitement initial, **la totalité des 86 photos sont alignées** et la configuration visuelle des stations permet de juger d'une cohérence entre les images d'une même station, acquises en un tour complet. La génération du nuage de points a été réalisée en moins d'une heure.

Avec le nuage de points généré à partir des 7 stations, il apparaît que la qualité du géoréférencement sur les points d'origine bâtie (servant au calcul du géoréférencement, au nombre de 20) est de **2,6 cm**, et la qualité calculée sur les points de vérification (ne servant pas au calcul du géoréférencement, au nombre de 9) aussi d'origine bâtie est de **2,7 cm**. Par conséquent, le géoréférencement du côté bâti est suffisant et pertinent avec la technique de levé réalisé.

Dans un deuxième temps, les **contrôles** de qualité ont été réalisés sur les points relevés le long du glissement et de la falaise. On observe que la valeur **RMS** finale est de **81 cm** environ (cf. Tableau 10). Trier par ordre croissant sur la valeur **RMS**, il peut être observé que les écarts sur chaque points suivent une variation. Celle-ci est représentée figure 50, ce qui permet une représentation plus concrète de l'erreur en chaque points. La taille de chacun de ces vecteurs, ayant comme points de départ la coordonnée vraie de chaque entité levée, ont été multipliés par 10 pour obtenir une meilleure visualisation.

n° de points	dX (cm)	dY (cm)	dZ (cm)	RMS (cm)
1053	3	-2	4	5
1056	2	-3	8	8
1057	2	0	12	12
1050	1	5	13	14
1060	4	3	14	15
1058	14	-18	21	31
1052	21	-33	-5	40
2050	2	-63	-20	67
2052	7	-74	-28	79
2053	-5	-77	-25	81
2051	10	-108	-40	116
2055	-10	-108	-50	119
2054	-10	-118	-47	127
2056	-20	-120	-49	131
2057	-28	-111	-64	131
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>73</b>	<b>32</b>	<b>81</b>

Tableau 10 : Écarts (dx, dy, dz) sur chacun des points de contrôle. Les points "10\_-" sont ceux levés le long du glissement, les points "20\_-" sur la falaise.

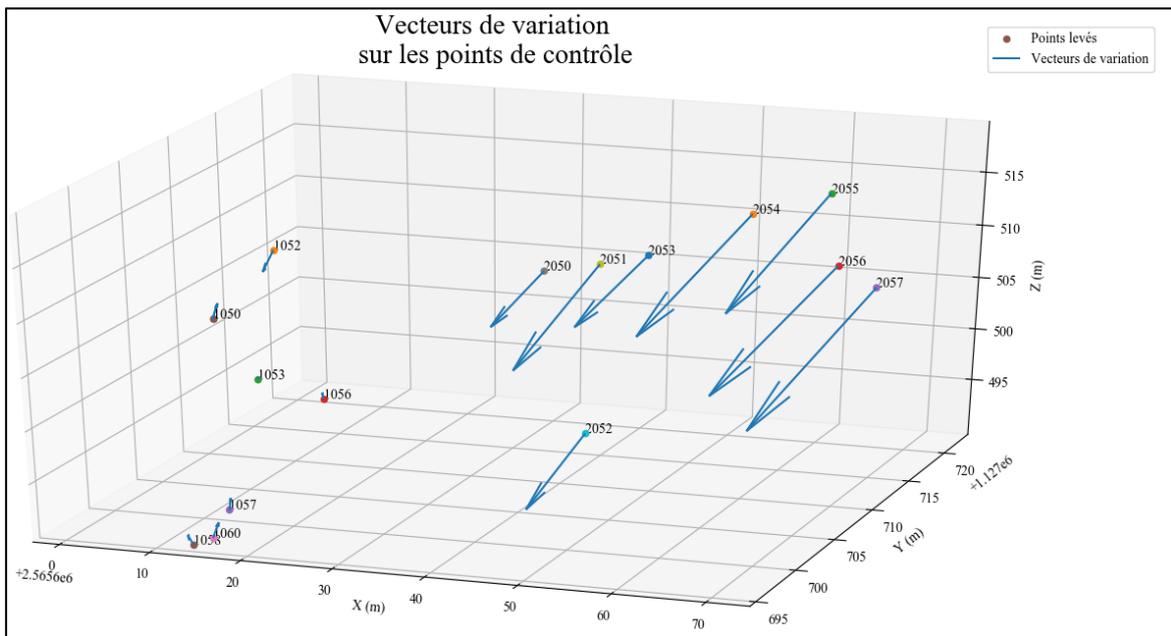


Figure 50 : Graphique des vecteurs de variation sur chacun des points de contrôle relevés, réalisé sous python

De plus, la mise à l'échelle du nuage de points peut être analysée pour vérifier que celle-ci n'est pas altérée par la méthode mise en œuvre :

Distance vraie 1053-1052 = 18,32 m  
Distance calculée 1053-1052 = 17,96 m

Écart : 36 cm

Distance vraie 2057-2050 = 53,68 m  
Distance calculée 2057-2050 = 53,49 m

Écart : 19 cm

Par conséquent, **cette configuration entache la mise à l'échelle du nuage d'une erreur**, ce qui s'avère réellement **problématique** pour les calculs réalisés par la suite. Il sera par conséquent **déconseillé** de mettre en œuvre la technique de photographie selon un angle de **360 °** avec un géoréférencement d'un seul côté, surtout si celui-ci a lieu à l'opposé de la zone d'étude.

#### IV.4 Détection de changement M3C2

Un nuage d'une seule époque a été acquis, de ce fait, la comparaison de deux époques différentes ne peut avoir lieu, mais l'étude des normales peut préalablement être effectuée.

La méthode mise en œuvre avec un bras motorisé fonctionne d'une bonne manière et est très simple de mise en œuvre sur Agisoft. A contrario, sur le logiciel Pix4D, la restitution s'avère très difficile. De ce fait, si à chaque époque de mesure le même paramétrage est utilisé pour la restitution, le calcul M3C2 devrait être lui aussi, réalisé de la même manière. Pour optimiser les temps de travail, il est bon de commencer les tests de calculs des normales pour trouver un paramétrage adapté.

Dans un premier temps, pour la partie falaise, le pendage<sup>12</sup> est pratiquement de 90 °, par conséquent, le calcul des normales à la surface peut être contraint selon le plan horizontal. Cependant, pour la partie du glissement, le pendage est quant à lui plus faible, d'environ 30 °. Par conséquent, le calcul des normales réalisé aura un impact sur les changements décelés entre deux nuages d'époques différentes. En effet, avec ce type de paroi, le calcul des normales selon un plan horizontal reviendra à calculer un « vecteur » de déplacement, ce qui permettra, par exemple, de détecter un phénomène de glissement de terrain (cf. Figure 51).

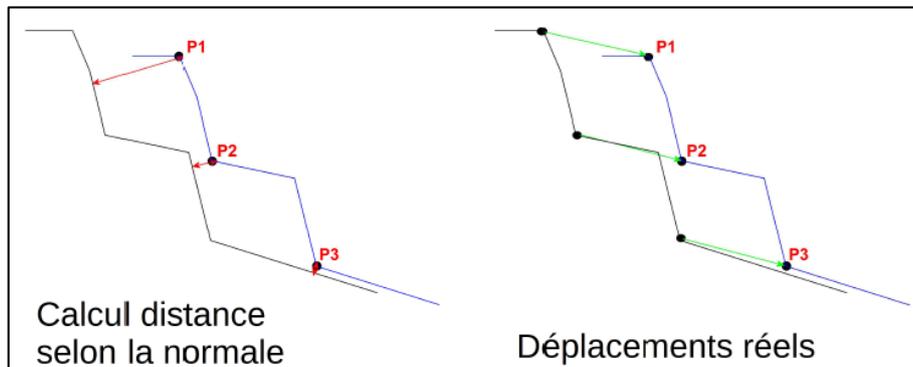


Figure 51 : Comparaison du "calcul de la distance selon la normale" pour la détection de changement et le calcul de "déplacement" 3D pour les mouvements de terrain. Source : M-A Chanut, Cerema Centre Est, Colloque SFPT, Mars 2017

Il est donc possible d'effectuer une rotation manuelle du nuage de points (en prenant note de la matrice de rotation pour effectuer l'application inverse) pour réaliser le calcul des normales selon un axe préférentiel, de manière verticale, ou horizontale. Avec ce type de manipulation, il peut être supposé l'obtention d'un calcul des normales cohérentes.

Les normales peuvent aussi ne pas être contraintes selon un axe avec le calcul de celles-ci effectué « par défaut », et réorientées si ces dernières apparaissent dans le sens inverse.

<sup>12</sup> Le pendage est l'angle d'inclinaison d'une couche sédimentaire par rapport à l'horizontale

Une fois les manipulations réalisées, le calcul des normales selon l'axe préférentiel +X est réalisé. Quant aux paramètres **D/2**, en procédant au préalable à quelques tests de valeurs, il s'avère qu'un rayon de **5 cm** (comme dans le cas de Bursins) permet d'obtenir une bonne appréciation des irrégularités du terrain. Cette pré-étude des normales permettra par conséquent d'être adaptée pour le futur nuage acquis à une époque postérieure.

#### IV.5 Bilan

Les résultats des tests à Bursins ont montré que la restitution photogrammétrique est faisable sur Pix4D ou sur Agisoft, mais dans un cas réel, il est alors fortement conseillé de privilégier Agisoft PhotoScan. En effet, grâce à cette application en cas réel avec l'implication d'un bras robotisé et d'une configuration photographique selon un angle de **360 °**, il fut remarqué que la **restitution photogrammétrique fonctionne très bien avec le logiciel Agisoft**, mais est très difficilement réalisable avec le logiciel Pix4D. La mise en place de points d'ancrage manuel sur les paires d'images d'une même station pour forcer leur correspondance sur Pix4D est longue et fastidieuse, d'autant plus que le résultat n'est pas satisfaisant.

Sur Agisoft, les nuages sont plus complets et exploitables, et le géoréférencement peut se réaliser sans difficulté grâce aux bâtis. Cependant, si ce dernier a lieu du côté opposé à la zone d'étude, **une erreur de plus d'un mètre** sur le géoréférencement de la paroi peut apparaître, et le **facteur de mise à l'échelle est erroné**.

Préalablement à une acquisition d'époque différente, il peut être recherché les paramètres optimaux pour le calcul des normales. Il apparaît que les paramètres utilisés pour la phase de tests à Bursins sont aussi appropriés dans le cas présent. Il faut prêter **attention au calcul des normales et à leur orientation lorsqu'un pan est particulièrement incliné**. Il est alors possible de spécifier un calcul des normales sans orientation ni axe préférentiel, ce qui peut cependant mener à des normales mal orientées.

Pour mettre en œuvre l'algorithme de **détection de changement M3C2**, il faudra acquérir des mesures à une époque différente, mais ce travail de fin d'études est bientôt terminé. Une phase de discussion a lieu avec une autre entreprise pour obtenir les données d'une époque antérieure à nos mesures. Les acquisitions précédentes ayant été effectuées par drone peu de temps après le déclenchement du glissement de terrain survenu le 21 Janvier 2018. Cela permettrait d'effectuer un enregistrement **ICP** puis l'algorithme **M3C2** entre deux époques différentes. Cependant, il est à noter que la qualité des données acquises n'est pas connue, ni à quoi leur utilisation est dédiée (orthophotographie, modélisation 3D, ...).

Enfin, après discussion avec l'UDN, il s'avère qu'une **méthode encore plus simple** n'impliquant **pas de mesure pour le géoréférencement** des données dans le système en vigueur leur conviendrait. D'autant plus qu'après analyse, il fut remarqué que la prise de mesure tachéométrique à chaque époque n'est pas obligatoire et que la méthode **ICP** permet d'obtenir de **meilleurs résultats**.

L'implication des professionnels de la mesure n'est donc pas indispensable à chaque mission, mais seulement lors de la première acquisition des données. Une question se pose alors : est-il possible de s'affranchir des mesures servant au géoréférencement ... ?

## V Perspectives

### V.1 Amélioration de la simplicité de la méthode

Il fut décidé d'établir un protocole pour la mise en place d'une méthode très simple. Cette dernière n'a pas été expérimentée, mais s'avère fonctionner dans le cadre de certains travaux architecturaux et patrimoniaux (Steiner et Cannelle 2015). La problématique principale des géologues est de déceler les zones actives des zones non actives, ainsi que de quantifier le volume de matières éboulées pour établir une base de données sur les temps de retour et émettre des probabilités sur les chutes de blocs futures.

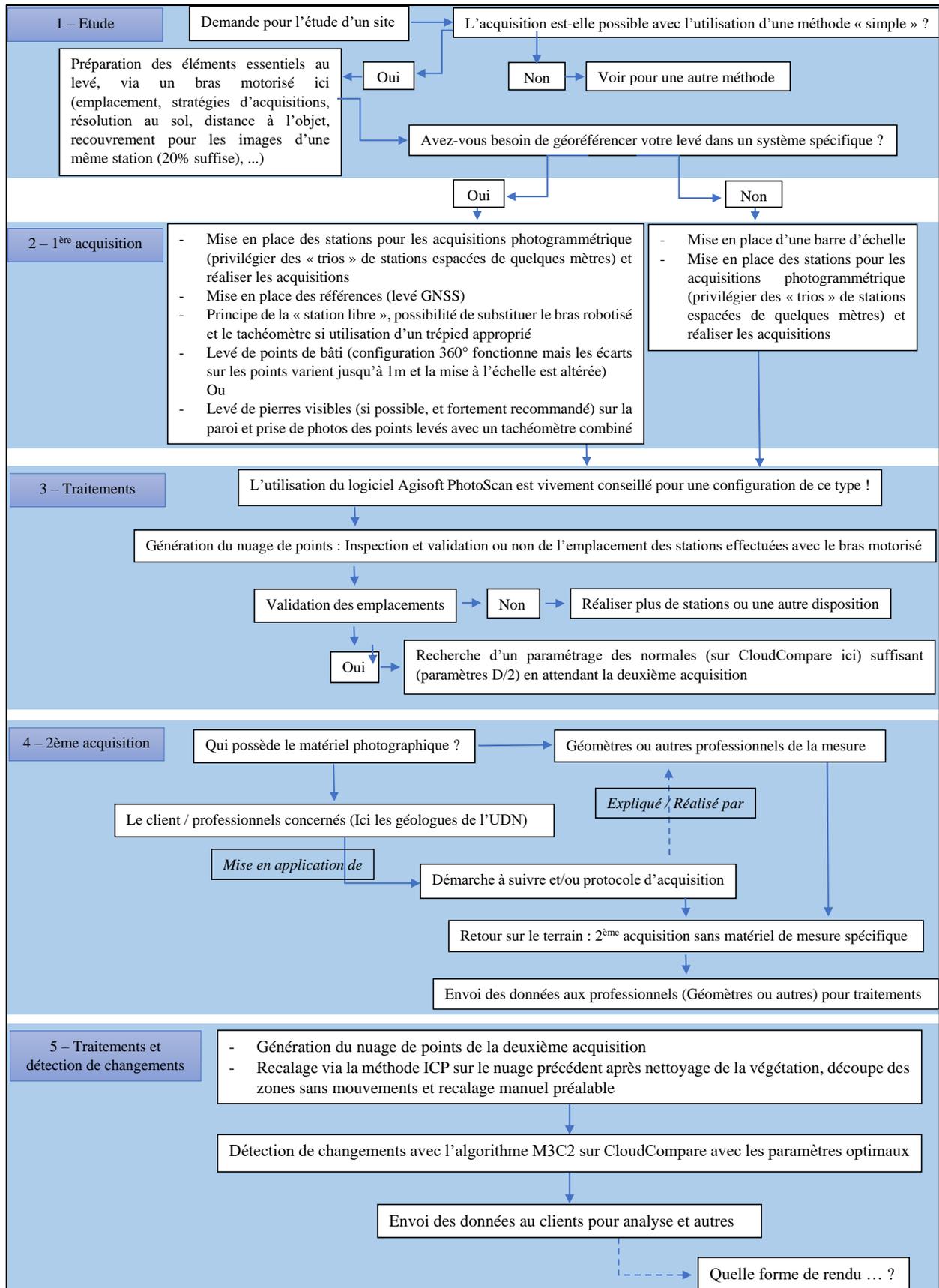
La **mise à l'échelle du nuage de points** est donc plus importante qu'un géoréférencement dans le système en vigueur. Lors de la première acquisition, il est alors sans doute possible de faire intervenir une barre d'échelle ou une mire graduée, matériel dont tous les géomètres disposent. Aucune mesure GNSS ni tachéométrique n'aura besoin d'être effectuée, seule la mise en place d'un bras motorisé, de l'appareil photo, de la mire et de quelques trépieds doit être réalisé, et seule la zone étudiée sera à acquérir. Cependant, il faudra **vérifier rigoureusement ce facteur** en plaçant par exemple, une mire en bas de la falaise pour la mise à l'échelle, et en haut, ou encore réaliser des mesures sur cibles naturelles, pour **contrôle**. Par la suite, le premier nuage de points étant mis à l'échelle, ceux d'époques ultérieures seront recalés grâce à la méthode ICP sur des zones sans mouvement, préalablement découpées et disposées au mieux dans l'espace.

Après la restitution photogrammétrique réalisable facilement sur Agisoft avec un faible recouvrement, ou sur Pix4D d'une manière plus laborieuse avec un recouvrement élevé (conseillée pour la recherche des points homologues), la suite des traitements peut s'effectuer grâce à CloudCompare et l'algorithme de détection de changement M3C2. Il est aussi utile de souligner que le nuage sera entaché d'une erreur de mise à l'échelle ne dépendant que de l'état de la mire, du pointé et de la prise de vue. Par exemple si la mise à l'échelle est entachée d'une erreur de **1 cm/mètre**, ce qui génère une erreur de **1 %** sur la distance vraie, pour **1 m<sup>3</sup>** de matériaux éboulés, le calcul de volumétrie sera entaché d'une erreur de **10 dm<sup>3</sup>**, ce qui représente environ **10 litres**. Ce qui constitue une erreur relativement faible en comparaison des résultats émis dans la partie III.2.

Concernant les **appareils non testés**, il est aussi possible de trouver du matériel moins coûteux que ceux mis en application ici, bien qu'un appareil photo avec une plage de bruit faible associé à une focale fixe de qualité est inévitable pour obtenir une modélisation 3D acceptable. Le **bras motorisé « Rodéon Pixpert »** utilisé dans les tests présentés vaut près de **5 000 €** à lui seul. Cependant, il est aussi possible de trouver des têtes panoramiques motorisées beaucoup **moins onéreuses** que ce dernier, au prix de **500 €** voire moins. Il est possible d'utiliser simplement un trépied de support d'appareil photographique classique pouvant être acquis à moins de **100 €**, équipé d'un niveau à bulle pour caler au mieux l'appareil photo de manière horizontale. Par la suite, il est possible de rajouter une simple **rotule**, motorisée au prix de **150 €** environ, ou non avec un simple marquage angulaire pour un recouvrement réalisé manuellement, au prix de **50 €**. Par conséquent, **s'équiper pour 6 000 € est possible** pour réaliser des acquisitions de cette envergure. De plus, après une formation sur le terrain, les géologues pourront réaliser leurs propres acquisitions, et transférer les photographies aux personnes compétentes pour traitements. Le travail se voit être réalisé rapidement, de manière optimale, et pour un coût accessible.

## V.2 Proposition d'un flux de travail optimal

À partir de maintenant, et après avoir étudié les diverses méthodes et techniques, un diagramme de flux de travail peut être réalisé, pouvant être appliqué par différents corps de métiers, avec l'intervention ou non des géomètres lors d'acquisition terrain.



### V.3 Le rendu des données

Dans le cadre de ce travail, il est aussi utile de discuter du rendu des données au client. Il fut remarqué qu'un véritable manque subsiste auprès des logiciels concernant cette étape finale. Cependant, il existe désormais la possibilité d'effectuer un transfert web des données, grâce au partage open source de nuage de points denses basé sur un WebGL (c'est-à-dire une interface de programmation tridimensionnelle dynamique). Les outils de ces derniers ne permettent pas réellement d'extraire les données essentielles au regard des géologues, ne servant qu'à la visualisation des nuages de points, la réalisation de quelques mesures et profils, ainsi que le calcul de volume au sein « d'une boîte » (sur Potree par exemple [www.potree.org](http://www.potree.org)). Sur la base de cet outil, il fut imaginé une visualisation stratégique des données grâce à des vues divisées, mises en correspondance.

L'objectif serait de pouvoir afficher les deux nuages de points d'époque différente, et la détection de changement réalisé sur ces derniers. Chaque mouvement opéré sur le nuage M3C2 serait répété sur les nuages *État 0* et *État 1* grâce à une mise en correspondance de la similitude 3D appliquée (cf. Figure 52). Lorsqu'un changement est détecté, il serait facile de zoomer sur cet élément et de vérifier si c'est un changement réel, une erreur due à la végétation restante ou encore un point aberrant. Il pourrait aussi être possible, en comparaison avec le logiciel 3D Reshaper qui permet la génération d'un rapport d'inspection, de réaliser la même procédure, avec éventuellement le choix d'une zone, la réalisation d'une coupe, et un calcul de volumétrie de l'élément sélectionné.

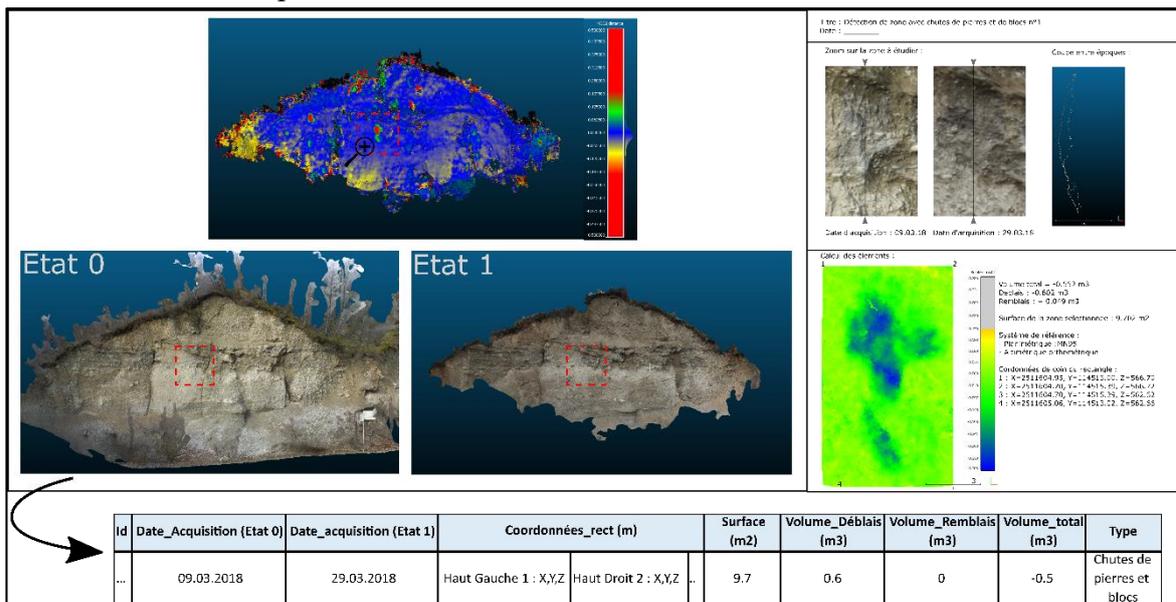


Figure 52 : Proposition d'une maquette d'interface et d'insertion des éléments détectés dans une base de données

De plus, il s'avère que tous les corps de métier sont de plus en plus amenés à manipuler les bases de données. Par conséquent, il serait utile d'archiver de manière rigoureuse les éléments éboulés, permettant de suivre l'évolution des différentes falaises, ou encore de prédire la probabilité de retour d'un événement, comme étudié par B. Feldmann (2017). Par conséquent, et à l'aide de ces vues divisées en correspondances, l'archivage des éléments éboulés pourrait se faire grâce à une sélection de la zone concernée, un découpage automatique de l'élément, et un calcul de volume (cf. Figure 52).

Cet outil n'a pas été réalisé au cours de ce travail, car il s'agit d'exploiter un langage de programmation orienté objet. Cependant, cette idée pourrait servir de base à des sujets de futur travail.

## Conclusion

Le présent travail a pour objectif le développement d'une méthode **simple, rapide et répétable**, pour la **détection** des chutes et de pierres et blocs et des éboulements, en collaboration avec l'UDN.

Pour cette étude, après une confrontation de plusieurs technologies exploitables en site « test », il est apparu que la méthode s'avérant être la plus pratique et la plus simple de mise en œuvre est la **photogrammétrie terrestre par l'utilisation d'un bras motorisé**, le géoréférencement du nuage de point étant effectuée grâce à la visée de cibles naturelles telles que des pierres nettement visibles.

Il a aussi été mis en évidence que le calcul des **distances**, réalisé grâce à l'algorithme **M3C2**, et que le calcul de **volume varie fortement** lorsqu'un géoréférencement est effectué pour des acquisitions d'époques différentes. De ce fait, la méthode de recalage de nuage à nuage, appelé aussi **méthode ICP**, a été mise en œuvre et les résultats sont beaucoup **plus satisfaisants**.

À l'issue de ces expérimentations, la **photogrammétrie terrestre par la prise de photographie de manière panoramique**, permettant un recouvrement automatisé et maîtrisé est mise en œuvre en cas réel. Il fut étudié la génération d'un nuage de points grâce à une prise de photographie selon un angle de **360 °**, et un **géoréférencement du côté bâti**, situé à l'opposé de la zone d'étude.

Les contrôles réalisés sur la paroi rocheuse ont montré que cette technique engendre une **variation**, avec des **écarts** pouvant atteindre l'ordre du **mètre** du côté de la zone étudiée, et la **mise à l'échelle** du nuage est **altérée**. Il doit aussi être souligné que le logiciel **Agisoft** est grandement **recommandé** pour ce type de configuration, permettant le groupement des photographies par stations.

Cependant, **la méthode peut encore être simplifiée**. Une **proposition d'amélioration** de celle-ci avec l'utilisation d'un matériel encore plus « Low-Cost » (Steiner et Cannelle 2015) et sans géoréférencement, grâce à l'utilisation d'une barre d'échelle ou mire graduée, est effectué.

De plus, il fut remarqué que le **rendu des données** tridimensionnelles au client demeure compliqué, il y a toujours un véritable manque au niveau de ceux-ci. De ce fait, une **idée** de développement d'une **interface graphique** pour la visualisation des données, basées sur des vues divisées mises en correspondance, est réalisée. Cette dernière permettrait aux géologues d'en **extraire les éléments essentiels** à leurs différentes études, et l'hypothèse d'historisation de ces entités au sein d'une **base de données** est aussi émise. Ces éléments ne sont pour l'instant qu'une idée de développement qui pourra éventuellement être réalisé dans le cadre d'un futur travail d'étudiant.

Ce sujet, dont la thématique principale sont les phénomènes naturels, m'a permis de mettre à profit mes diverses connaissances sur une problématique d'actualité qui me passionne, cela additionné aux travaux de géomatique « purs » ont fait de ce travail une étude réellement intéressante et profitable pour la suite de mes projets.

D'autre part, ce travail réalisé au sein d'un milieu professionnel structuré et enrichissant m'a permis d'apprécier particulièrement l'aspect de recherche et de me familiariser avec la démarche intellectuelle du chercheur. Je tiens à remercier encore une fois le bureau **HKD Géomatique Vaud SA** et l'entière des personnes présentes au sein de ce bureau pour m'avoir encadré et accueilli durant ces quelques mois.

L'ingénieur est voué à développer des méthodes avec les outils qu'ils possèdent et maîtrisent, ainsi que de trouver des solutions aux problématiques posées, ce qui je l'espère sera suffisamment reflété au cours de ce travail. Cette étude m'a finalement apporté beaucoup plus que je ne l'imaginai au départ, j'ai pu mettre en application diverses techniques, de l'aspect terrain jusqu'au traitement. J'ai également eu l'opportunité de rencontrer différents professionnels de la géomatique ainsi que de découvrir des outils d'acquisition et de traitement divers. Certaines de ces technologies sont encore onéreuses de nos jours, mais deviendront sûrement dans quelques années des outils de qualité disponible à moindres coûts.

Nous sommes dans une époque où les technologies, les méthodes et les outils sont en développement constant. Il est donc primordial de rester à l'écoute des nouveautés pour toujours être à la pointe de la technologie, ainsi que dans une optique d'innovation, nous permettant chaque jour, de voir plus loin que les résultats escomptés.

## Bibliographie

- « Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur - Professional Edition, Version 1.1 ». 2015. Disponible sur : [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com).
- Barras, Vincent, Bertrand Cannelle, et Guillaume Chapotte. 2017. « Lasergrammétrie - Auscultation sans réflecteur ». *Revue XYZ*, n° 151: 45-52.
- Brodu, Nicolas, et Dimitri Lague. 2012. « 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n° 68: 121–134.
- D'Amato, Julie. 2017. « Apport d'une base de données d'éboulements rocheux obtenue par scanner laser dans la caractérisation des conditions de rupture et processus associés ». Institut des Science de la Terre: Université Grenoble Alpes - Spécialité Sciences de la terre, de l'univers et de l'environnement.
- Devernay, Frédéric. 2005. « Détection de points d'intérêts - Mise en correspondance ». 2005. Disponible sur : [www.devernay.free.fr/cours/vision](http://www.devernay.free.fr/cours/vision).
- Fadili, Maryem. 2015. « Modélisation des nuages de points acquis par lasergrammétrie en milieu naturel : application à l'auscultation des berges de rivières à faible énergie ». Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur Cnam spécialité Géomètre et Topographe. Le Mans: ESGT.
- Feldmann, Baptiste. 2017. « Caractérisation fine de l'aléa chute de blocs en milieu côtier ». Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur Cnam spécialité Géomètre et Topographe. Le Mans: ESGT.
- Girardeau-Montaut, Daniel. 2006. « Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles ». PhD Thesis, Télécom ParisTech.
- Grussenmeyer, Pierre, et Tania Landes. 2011. « Lasergrammétrie - Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre: systèmes et caractéristiques (partie 1/2) ». *Revue XYZ*, n° 128: p.37-49.
- Lague, Dimitri, Nicolas Brodu, et Jérôme Leroux. 2013. « Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the Rangitikei canyon (NZ) ». *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 82: p.10-26.
- Poublang, Philippine. 2012. « Caractérisation des points remarquables dans les images et recalage ». Projet de programmation, Master de Sciences de l'information et des systèmes, spécialité Imagerie Numérique (Marseille Université de la Méditerranée). 2012. Disponible sur : <https://sites.google.com/site/poublangsift/>.
- Ravelet, Michel. 2016. « “Jean-pierre” modélisé ». *Géomètre*, n° 2141 (novembre): p.12-14.
- Rose, Hugo. 2012. « Photogrammétrie - Processus de création de nuages de points par corrélation d'images ». *Revue XYZ*, n° 131: p.19-23.
- Simiar, Marc. 2016. « Un monument naturel modélisé ». *Géomètre*, n° 2135 (avril): p.16-19.
- Steiner, Grégory, et Bertrand Cannelle. 2015. « La photogrammétrie peut-elle remplacer la topométrie traditionnelle pour du levé de bâtiments ? » *DGPF, Société allemande de photogrammétrie, télédétection et géoinformation*. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/304246179\\_La\\_Photogrammetrie\\_peut-elle\\_Remplacer\\_la\\_Topometrie\\_Traditionnelle\\_pour\\_du\\_Leve\\_de\\_Batiments](https://www.researchgate.net/publication/304246179_La_Photogrammetrie_peut-elle_Remplacer_la_Topometrie_Traditionnelle_pour_du_Leve_de_Batiments).
- Vuillemin, Thierry. 2009. « Lasergrammétrie - Scannerisation laser et photogrammétrie : deux techniques complémentaires pour l'étude des risques naturels par télédétection rapprochée en haute montagne ». *Revue XYZ*, n° 120: p.40-44.

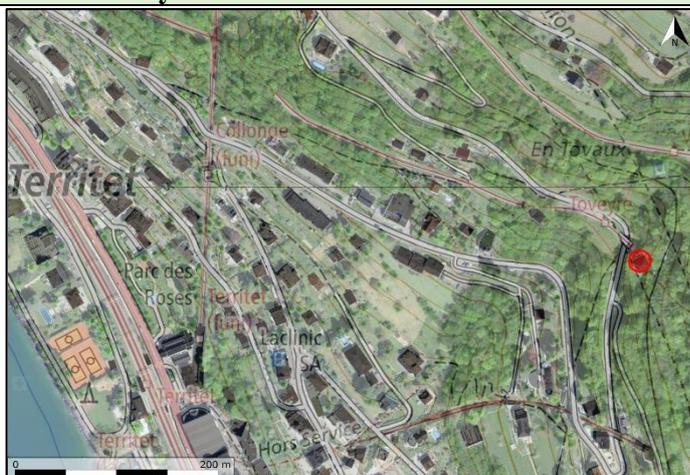
## Table des annexes

Annexe 1 Fiche des sites étudiés.....	61
Annexe 2 Calculs de photogrammétrie .....	68
Annexe 3 Feuille de calcul automatisé réalisé sur Excel .....	69
Annexe 4 Visualisation des nuages générés sur Pix4D.....	70
Annexe 5 Visualisation des nuages générés sur Agisoft.....	73
Annexe 6 Tableau de comparaison des nuages générés sur Pix4D et Agisoft .....	74

# Annexe 1

## Fiche des sites étudiés

### Site 1 : Rocher de Toveyres



**Cartes de localisation** : à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016, source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch)

### Localisation

Le Rocher de Toveyres est situé au sud-est de la ville de Montreux, au nord-est du village de Territet, le long de la route de Glion et plus précisément au-dessus de la ligne de chemin de fer « Montreux-Glion-Rochers de Naye » à seulement une cinquantaine de mètres de l'arrêt « Toveyres ».

### Photographies



**Photographies** : Rocher de Toveyres, Sources : Unité des dangers naturels

### Caractéristiques du site

- Paroi rocheuse de faible hauteur : environ 30 m de haut sur 70 m de long.
- Géologie : Soubassement rocheux de calcaire siliceux, recouvert par un encroutement de tufs calcaires.
- Obligation d'une certaine proximité de la paroi, point de vue éloigné difficile (10 m environ), possibilité d'acquisition le long de la route/du trottoir et sur la voie de chemin de fer.
- Aucun problème d'accessibilité avec la route de Glion à proximité.
- Végétation est envahissante en période estivale.
- Forte présence d'élément bâti à proximité (poteau, barrière, chemin de fer ...).

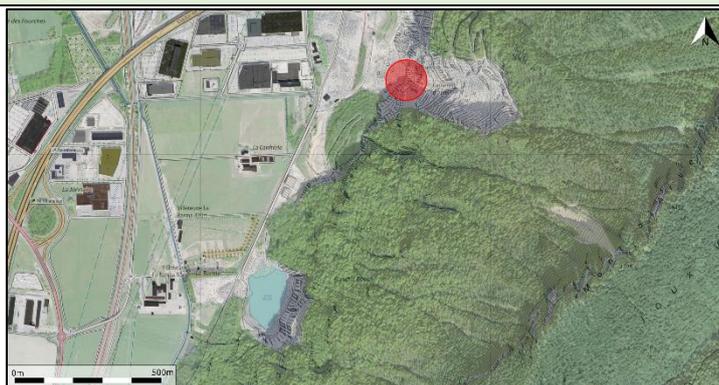
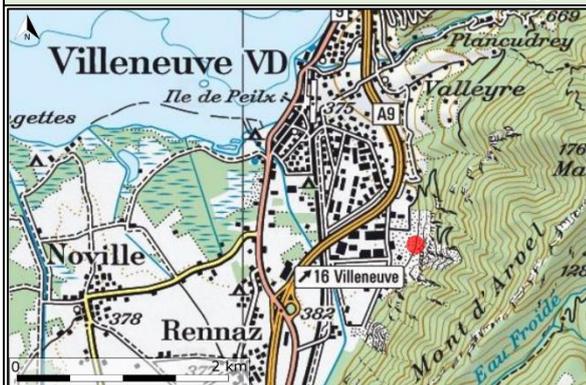
### Risques et enjeux

Recensement d'événement de type éboulement, écoulement et éboulis. Plusieurs éléments sont ici menacés : la ligne M-V-R, la villa implantée au-dessus du rocher, la route de Glion et le chemin de Cotterd.

### Dispositifs existants

Le site fait l'objet de mesures de déformation sur la villa présente au-dessus du rocher, mais elles ne permettent pas d'évaluer la dangerosité réelle du site. Une auscultation des contreforts (mur en moellons) disposés sur la face ouest et nord-ouest a été réalisée et des barrières pare-pierres sont en places. Un dossier d'études de variantes a été réalisé (principalement pour la mise en place d'alarme ou de surveillance rapprochée) par le Bureau d'Études géologiques (BEG SA). Des ouvrages de protection de type filets et treillis sont disposés autour de la paroi.

## Site 2 : Monts d'Arvel

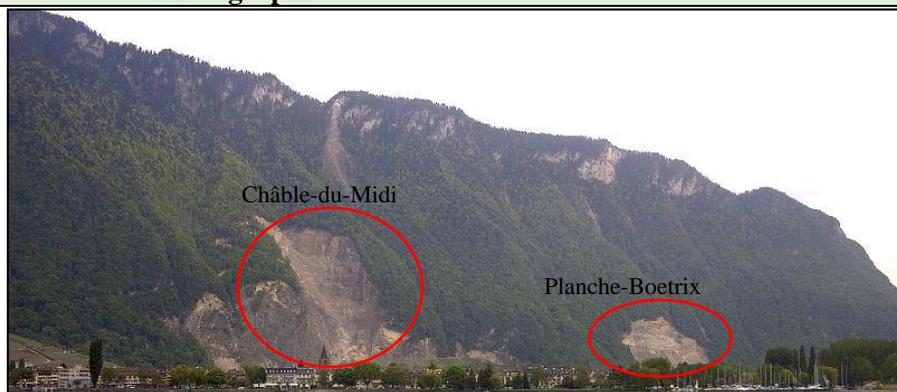


**Cartes de localisation :** à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016  
source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch)

### Localisation

Les Monts d'Arvel sont situés sur le territoire de la commune de Villeneuve, c'est une crête des Préalpes Vaudoise située dans le Canton de Vaud, et dont le versant Nord est exploité en carrière depuis le moyen âge.

### Photographies



**Photographies :** Mont d'Arvel, Sources : à gauche Unité des dangers naturels, à droite [www.sos-arvel.ch](http://www.sos-arvel.ch)

### Caractéristiques du site

- Monts de très grande hauteur : plus de 1 000 m de dénivellée et une longueur supérieure à 1 km.
- Géologie : principalement de type calcaire et des zones d'éboulis sont présents en pied de falaise.
- Accessibilité au pied de la paroi et à différents points de vue plus ou moins éloignés réalisable facilement par la route.
- En période estivale comme hivernale, la végétation est toujours présente (hormis sur les zones d'utilisation pour l'extraction de matériaux).
- Utilisation particulière de la zone en carrière

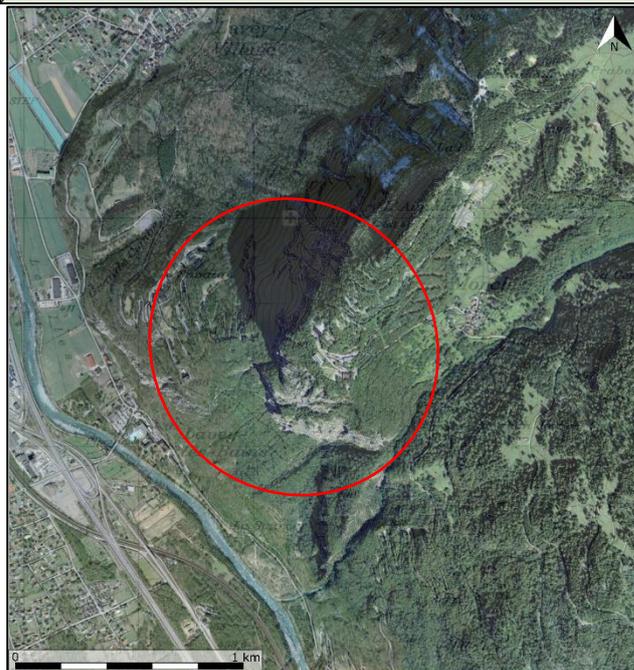
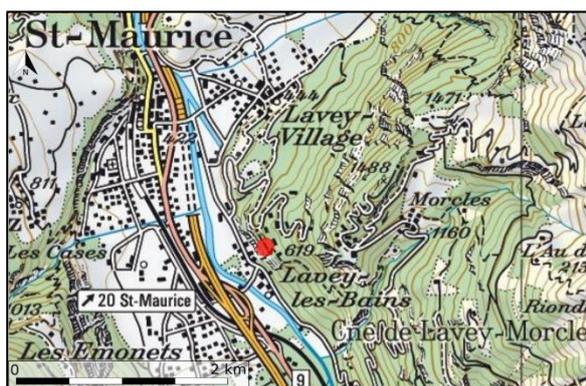
### Risque et enjeux

Au moins trois événements significatifs se sont produits dans la zone : en 1922, un éboulement de 600 000 m<sup>3</sup>, en 2008 un autre de 20 000 m<sup>3</sup> a eu lieu dans la carrière « Châble-du-midi » et en 2011 un tir de mine a occasionné l'éboulement accidentel d'une berme d'un volume de 6 000 à 8 000 m<sup>3</sup>. Les habitations sont relativement loin des monts, ce qui n'entraîne pas de risques pour les résidents. Nous sommes en zone de danger élevé, mais la zone boisée est à fonction protectrice.

### Dispositifs existants

Les zones exploitées font l'objet d'une surveillance en continu par un monitoring des déplacements par Radar interférométrique GB-InSAR. Aucun aménagement de type treillis ou filets n'est présent.

### Site 3 : Lavey-les-bains



**Cartes de localisation :** à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016  
Source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch).

#### Localisation

Les falaises de Lavey-les-Bains se trouvent sur le territoire de la commune de Lavey-Morcles dans le Canton de Vaud. Ce village est notamment connu pour ses bains thermaux, dont ceux-ci sont situés en pied de falaise.

#### Photographies



**Photographies :** à gauche et au centre ; falaises de Lavey, à droite ; observation de blocs décrochés.  
Source : personnelle - Date de prise de vue : 2018.02.21

#### Caractéristiques du site

- Falaises de très grande hauteur : plus de 1 000 m de dénivellation et une longueur supérieure à 1 km.
- Géologie : Calcaire et Gneiss, on dénombre une présence forte d'éboulis en pied de falaise.
- Accessible facilement par la route à proximité et bon nombre de voies routières permettent des points de vue éloignés de bonne qualité.
- Végétation très présente, et une zone boisée à fonction protectrice est comprise entre les zones de prise de vue et la paroi elle-même.
- Des filets de protection sont présents à quelques endroits

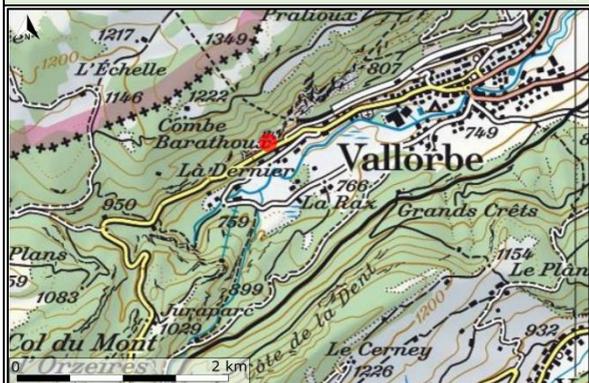
#### Risque et enjeux

On ne recense pas d'événement récent et de grande ampleur dans cette zone, mais il peut être observé sur le site des décrochements de différent calibre, apparemment très fréquents (éboulis et chute de pierres et de blocs très fréquents, mais retenus par la végétation). Les bains de Lavey et les habitations environnantes sont extrêmement exposés.

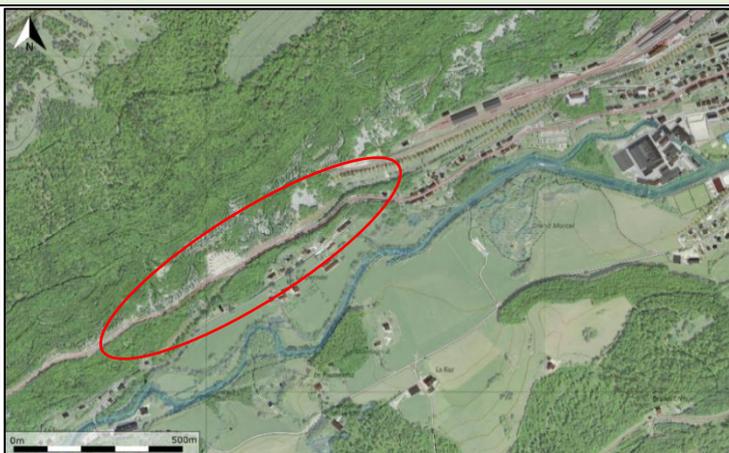
#### Dispositifs existants

Aucun dispositif de surveillance ou d'alarme n'est présent sur le site. Uniquement des barrières pare-pierres, deux digues de protections et des filets de protection.

#### Site 4 : Vallorbe



Cartes de localisation : à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2014. Source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch).



#### Localisation

Les falaises de Vallorbe sont situées sur le territoire de la commune de Vallorbe, dans le Canton de Vaud. Le site d'étude est notamment situé au Nord-Ouest de la commune et surplombent la DP91, dans la zone non concernée par la voie de chemin de fer, la partie suivante étant déjà protégée et suivie de manière ponctuelle.

#### Photographies



#### Photographies :

À gauche falaises visibles de la gare de Vallorbe

À droite ; éboulement en 2010 sur la plaque tournante CFF

Sources : Unité des dangers naturels, [www.vd.ch](http://www.vd.ch)

#### Caractéristiques du site

- Falaises de 200 à 300 m de hauteur et l'étude serait portée sur un kilomètre environ.
- Géologie : type calcaire (roche très compétente) et on recense aussi diverses zones d'éboulis. Les blocs calcaires se décrochent sous forme de bancs avec des lignes de fractures nettement visibles. Dans ce type de configuration, la chute de petits éléments peut être caractéristique d'une chute d'élément de taille plus élevée par la suite.
- Falaises surplombant la route et la voie de chemin de fer, accessible par voie routière sans inconvénient, mais une certaine proximité à la paroi est obligatoire.
- Végétation dense, mais peut vite devenir problématique en période estivale.

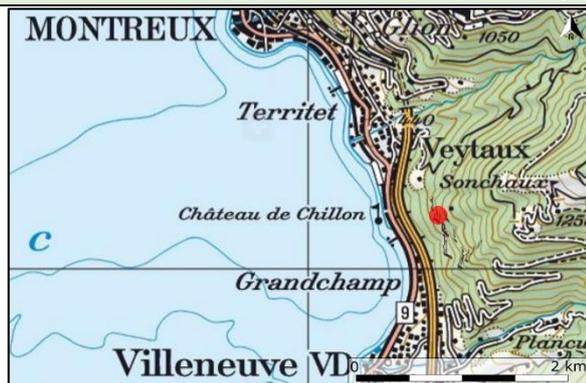
#### Risque et enjeux

Deux événements conséquents sont recensés sur ces lieux, sans dégâts humains occasionnés. En 2010 un éboulement de 800 m<sup>3</sup> qui a affecté les infrastructures ferroviaires (photographie de droite) et un événement plus récent de décembre 2013 avec la chute d'un bloc calcaire de 5,5 T sur la RC152. De plus, une vingtaine de chutes de blocs de 0,01 m<sup>3</sup> à 6 m<sup>3</sup> ont été recensées de 1959 à 2012.

#### Dispositifs existants

Selon la zone, on pourra trouver des zones boisées à fonction protectrice, des digues de retenues et des filets et treillis métalliques.

## Site 5 : Veytaux



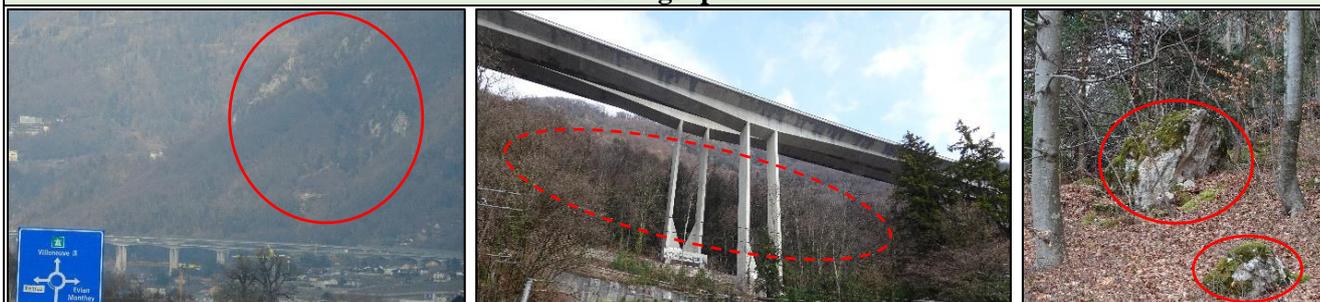
**Cartes de localisation** : à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016.  
Source : [www.geo.vd.ch](http://www.geo.vd.ch)



## Localisation

Les falaises de Veytaux sont situées sur le territoire de la commune de Veytaux, dans le Canton de Vaud, au sud-est de la commune, à l'est du château de Chillon, surplombant ce dernier ainsi que l'autoroute A9 traversant la commune.

## Photographie



**Photographies** : à gauche falaises de Veytaux – point de vue éloigné, au centre point de vue à proximité difficile (A9 visible), à droite observation de blocs décrochés, Source : personnelle - Date de prise de vue : 2018.02.21

## Caractéristiques du site

- Falaises de 600 à 700 m de hauteur sur une longueur d'un kilomètre environ.
- Géologie : type calcaire et éboulis.
- Accessible par les voies de circulation très passante en pied de falaise. Mais les falaises sont accessibles uniquement à pied en ½ heure à partir de la vallée.
- Falaises sont envahies de végétation, impossibilité de réaliser des acquisitions à une faible distance (c'est-à-dire en pied de paroi) ou réaliser des acquisitions longues distances ou via l'autoroute située à environ à une hauteur de 50-60 m au-dessus du terrain naturel (ce qui serait donc très dangereux).

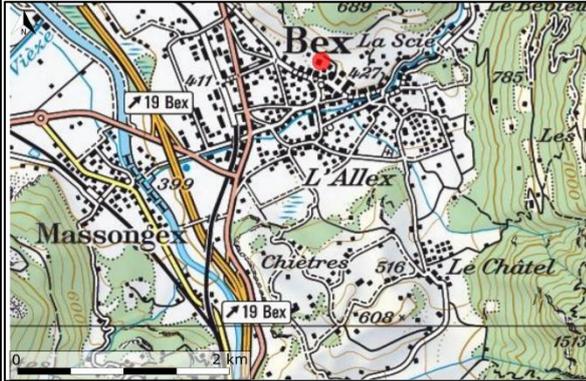
## Risque et enjeux

Entre 2011 et 2012 ont été recensés diverses chutes de pierres causant d'importants dégâts aux filets de protection, ainsi qu'en 2013 ramenant au goût du jour la problématique générale des instabilités rocheuses dans ce secteur. Ce sont les seuls événements recensés jusqu'à ce jour.

## Dispositifs existants

La forte zone boisée présente sur les lieux est à fonction protectrice, on dénombre aussi une forte présence de digues de retenues et de filet ou treillis métalliques, cependant couloir très actif pose problème. Le filet de protection a dû être changé à plusieurs reprises, et une solution alternative est étudiée en ce moment par le bureau d'étude.

## Site 6 : Bex



**Cartes de localisation** : à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016  
Source : [www.bex.geocommunes.ch](http://www.bex.geocommunes.ch)

### Localisation

Le site d'étude est situé dans la commune de Bex, au lieu-dit « En Soressesx », dans le Canton de Vaud. Plus précisément à environ 100 m de la place marché et de la rue centrale. La zone instable est située en amont de diverses propriétés privées ou publiques.

### Photographie



**Photographies** : à gauche et au centre ; falaises de Bex - Date de prise de vue : 2018.02.21, à droite ; désolidarisation d'un bloc,  
Source : personnelle et UDN

### Caractéristiques du site

- Falaise de faible hauteur : environ 20m de haut sur une longueur de 70 m environ.
- Géologie : type Gypse, pierre très friable (d'où le détachement en blocs de petite taille). Un bloc-écaille de 3 m<sup>3</sup> est d'ailleurs désolidarisé de la paroi rocheuse (Photographie de droite).
- Accessible sans problème par les routes villageoises et les propriétés privées situées à moins de 30 m du pan rocheux.
- Végétation extrêmement dense dans ce secteur.

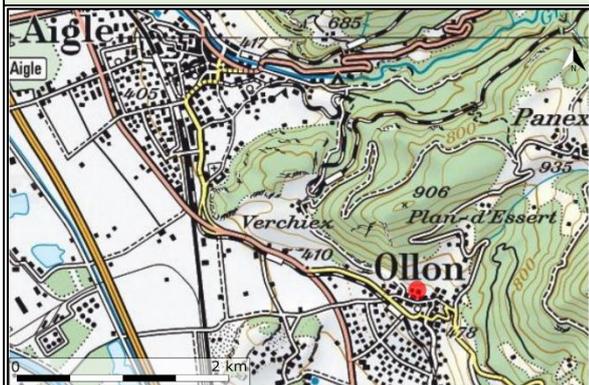
### Risque et enjeux

Dans cette zone nous pouvons trouver plusieurs instabilités dont les aléas sont diffus, on ne recense pas d'événement extrême ici, mais seulement quelques chutes de pierres et de blocs de faible volume. De nombreuses propriétés sont en contrebas de la falaise à une vingtaine de mètres de celles-ci. De nombreuses petites pierres (ou blocs épars) sont visibles au sol, et les propriétaires à proximité ont émis l'hypothèse d'un mouvement des murs de soutènement.

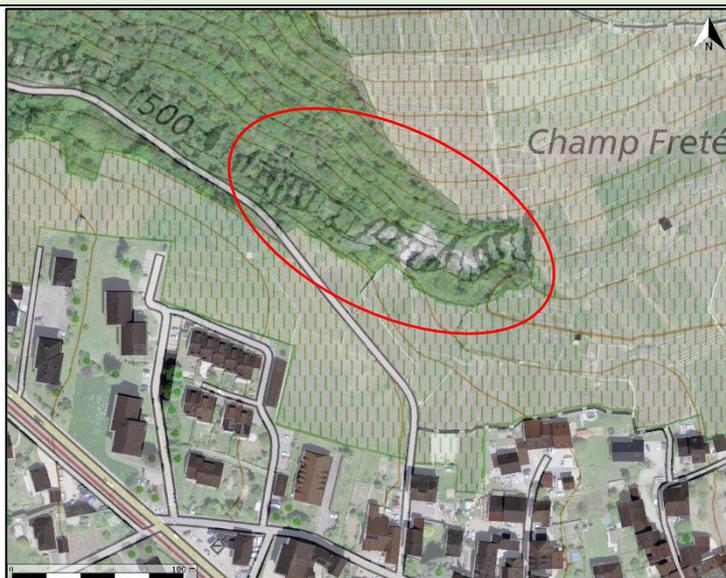
### Dispositifs existants

La végétation dense présente sur les sites permet une retenue des blocs, ce qui peut aussi cependant, provoquer d'importantes fissures ainsi que la désolidarisation des éléments. Des digues de retenue et des murs de soutènement sont en place.

## Site 7 : Ollon



**Cartes de localisation** : à gauche carte nationale Swisstopo, à droite fond de plan : carte nationale Swisstopo, Orthophoto : SwissImage 25 cm 2016.  
Source : [www.ollon.geocommunes.ch](http://www.ollon.geocommunes.ch)



### Localisation

La falaise d'Ollon est située dans la commune d'Ollon, dans le Canton de Vaud. La zone est située au nord de la commune entre zone viticole et forestière, le long de la route de Verschiez.

### Photographie



**Photographies** : (a) Glissement à gauche et Falaise à droite, (b) Zoom sur la roche mise à nue, (c) Vision plus éloignée : Glissement à gauche, falaise à droite, (d) Accumulation de 50 m<sup>3</sup> sur la route de Verschiez. Source : personnelle - Date de prise de vue : 2018.02.21

### Caractéristiques du site

- Zone possédant une dénivellée d'environ 100 m et on remarque deux sites distincts : le glissement récent (photographie (a) et (b)) mettant la roche totalement à nue et une partie falaise (bien visible sur la photographie (c)).
- Géologie : type Gypse, pierre très friable.
- Accessibilité et éloignement à la paroi ne causent pas de problème ici.
- Végétation très dense en période estivale.

### Risques et enjeux

Un glissement de terrain est survenu sur la partie ouest de la zone d'étude, quelque 4 000 m<sup>2</sup> de la colline ont dévalé la pente, soit environ 50 m<sup>3</sup>. De ce fait, les niches d'arrachements sont nettement visibles sur les côtés du glissement et la roche est totalement mise à nue, ce qui risque d'affaiblir la structure géologique et causer diverses chutes de pierres et blocs. La partie est est une paroi totalement verticale dont le ruissellement de l'eau s'accumule en amont est risque de provoquer un décrochement rapide en cas d'une trop forte accumulation. Il n'y a pas de risque élevé ici, mais la zone de vignoble est exposée ainsi que la maison d'habitations en contrebas.

### Dispositifs existants

Aucun dispositif à l'heure actuelle, il y a en prévision une mise en place de treillis le long du glissement et/ou des niches d'arrachement, et un concept de drainage est aussi en cours de proposition. Des murs de soutènement sont disposés le long des vignobles. La végétation arbustive et arborée présente sur les lieux permet une fonction protectrice et de retenue le plus souvent.

## Annexe 2

### Calculs de photogrammétrie

En photogrammétrie, chaque pixel de l'image est « projeté » au sol (cf. Figure A). La « distance d'échantillonnage » observée est calculée de la manière suivante :

$$tps = \frac{D}{f} \times tpi$$

Avec :

*tps* : la taille d'un pixel sol<sup>13</sup> (m)

*tpi* : la taille d'un pixel de l'image (pixel)

*D* : la distance à l'objet (m)

*f* : la focale (m)

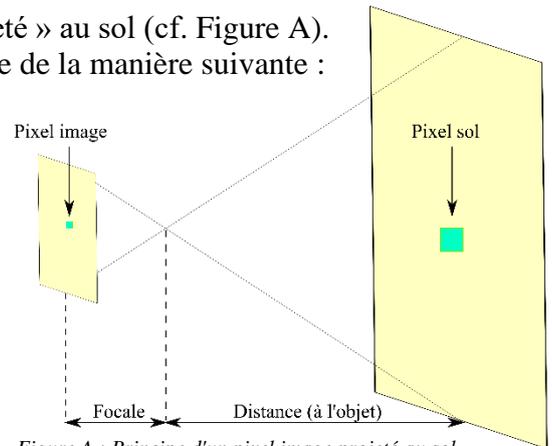


Figure A : Principe d'un pixel image projeté au sol

Par la suite, connaissant la taille de la zone à lever, les éléments essentiels pour l'organisation d'une mission de photogrammétrie peuvent être calculés simplement (cf. Figure B).

Nombre de bandes :  $nb = \frac{Laz}{Di}$  avec  $Di = La(1 - Ry)$

Nombre d'images :  $ni = \frac{Loz}{B} + 2$

Déplacement entre les clichés :  $B = Lo(1 - Rx)$

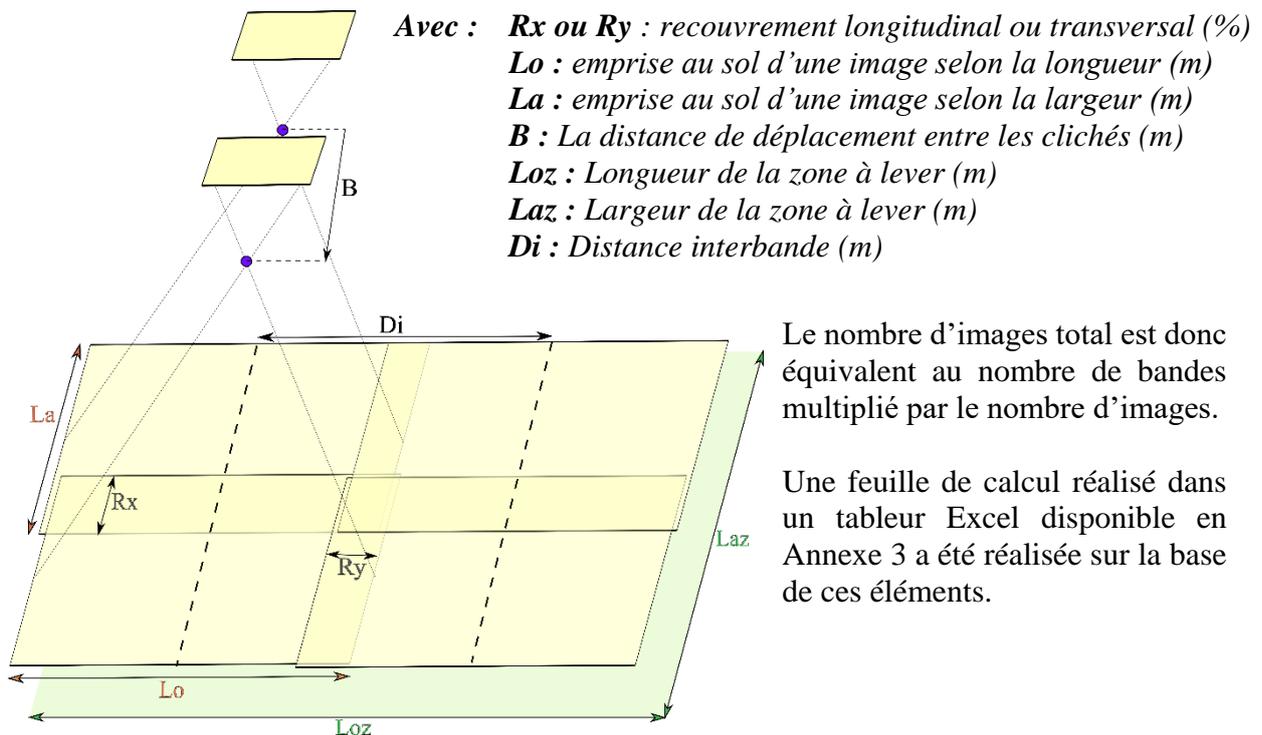


Figure B : Schéma des éléments à prendre en compte pour l'organisation d'une mission photogrammétrique

Le nombre d'images total est donc équivalent au nombre de bandes multiplié par le nombre d'images.

Une feuille de calcul réalisée dans un tableur Excel disponible en Annexe 3 a été réalisée sur la base de ces éléments.

<sup>13</sup>Un pixel de l'image est en réalité un « photosite », principalement énoncé en microns (µm) dans les caractéristiques techniques de l'appareil utilisé. Il est en relation directe avec la résolution, énoncé en mégapixel (Mpx). Une image acquise étant une matrice de pixel.

### Annexe 3

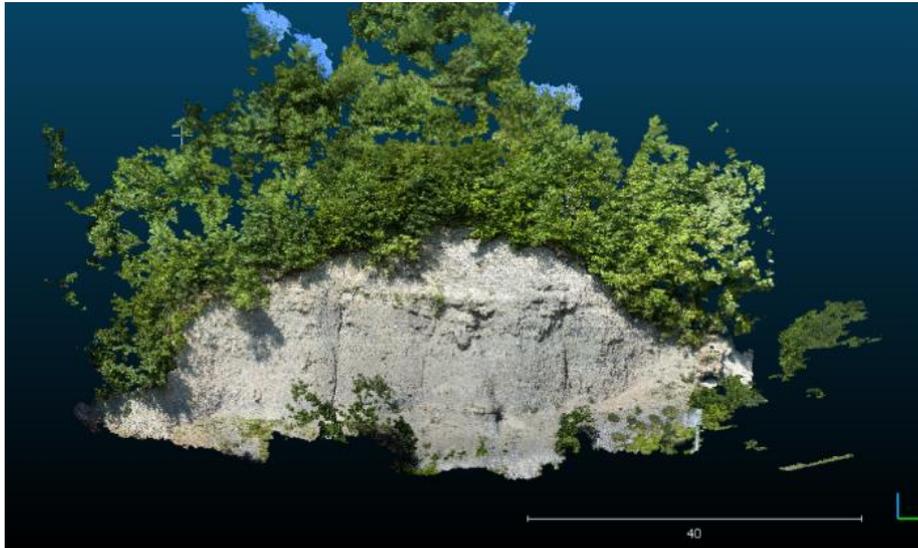
## Feuille de calcul réalisé sur un tableur Excel

Photogrammétrie terrestre												
<i>Légende</i>												
Liste déroulante												
Élément à renseigner manuellement												
Élément automatique												
<b>Choix des données</b>												
<b>Éléments de calcul</b> ↓		Choix de l'appareil photo	Olympus E510									
		Choix de la focale (mm)	30									
		Distance à l'objet (m)	50									
<b>Taille de l'objet approximative (m)</b>												
Loz	→	Longueur (m)	100									
Laz	→	Largeur/Hauteur (m)	100									
<b>Recouvrement (%)</b>												
Rx	→	Horizontal (%)	60									
Ry	→	Vertical (%)	40									
<b>Information sur le capteur</b>												
		Résolution (Mpx)	10									
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>pixel</th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Longueur (m)</td> <td>3648</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>Largeur/Hauteur (m)</td> <td>2736</td> <td>24</td> </tr> </tbody> </table>		pixel	mm	Longueur (m)	3648	36	Largeur/Hauteur (m)	2736	24
	pixel	mm										
Longueur (m)	3648	36										
Largeur/Hauteur (m)	2736	24										
		Taille de capteur (m)	9.86842E-06									
		Taille de pixel sol obtenue (cm)	1.645									
<b>Emprise d'une photo (m)</b>												
Lo	→	Longueur (m)	60,00									
La	→	Largeur/Hauteur (m)	40,00									
<b>Distance entre images à appliquer (m)</b>												
$B = Lo ( 1 - Rx )$	→	Longueur (m)	24,00									
$Di = La ( 1 - Ry )$	→	Largeur/Hauteur (m)	24,00									
<b>Calcul du nombre d'images</b>												
$nb = Laz / Di$	→	Nombre de bandes	5									
$ni = ( Loz / B ) + 2$	→	Nombre d'images selon la longueur	7									
		Nombre total d'images	35									

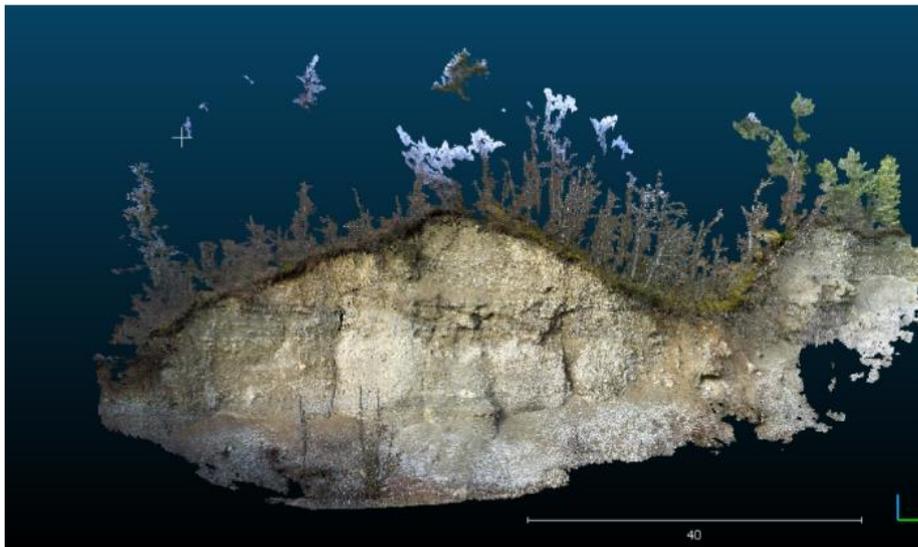
## Annexe 4

### Visualisation des nuages générés sur Pix4D

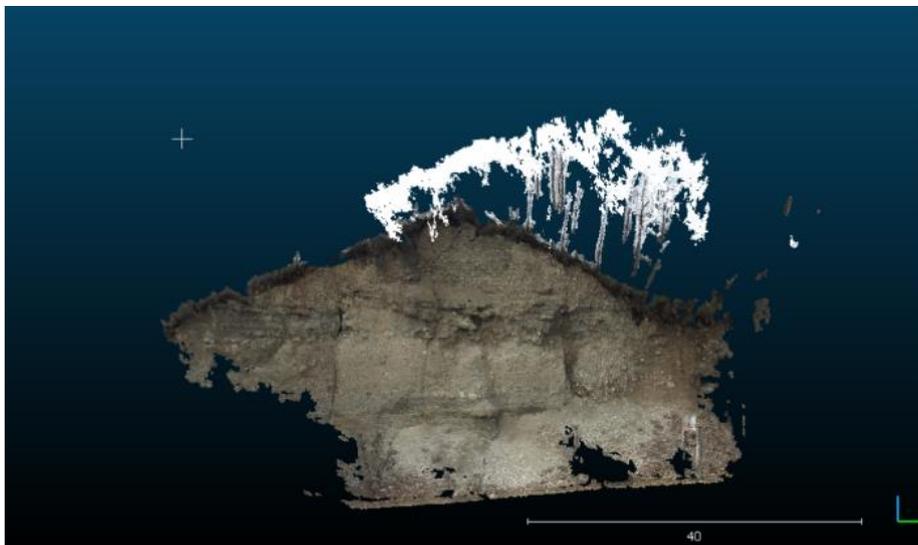
1 - 2017 - Albris - 24 860 178 points



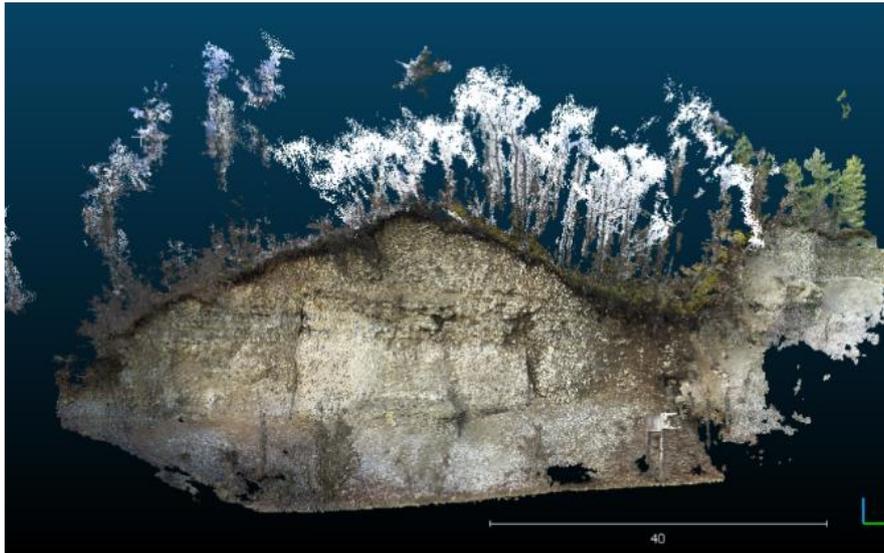
2 - 2018 - Albris - 14 709 702 points



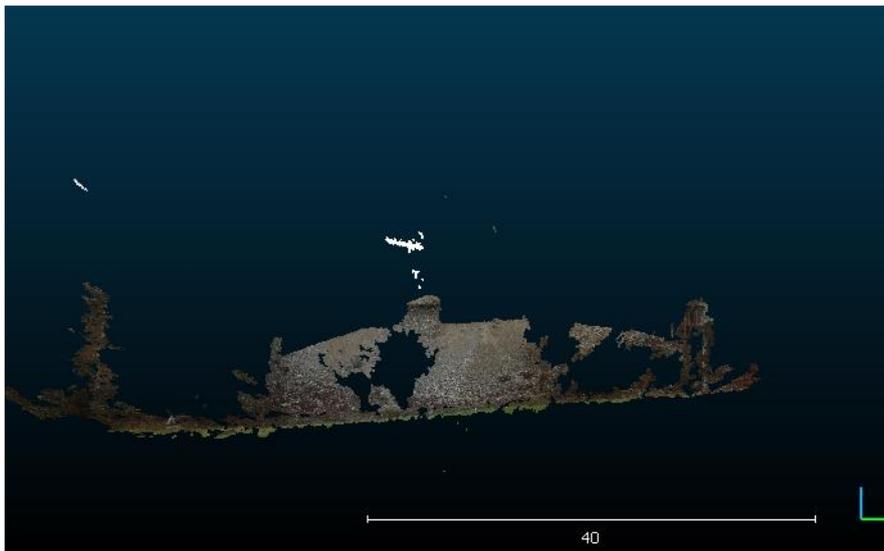
3 - 2018 - Olympus 6 424 865 points



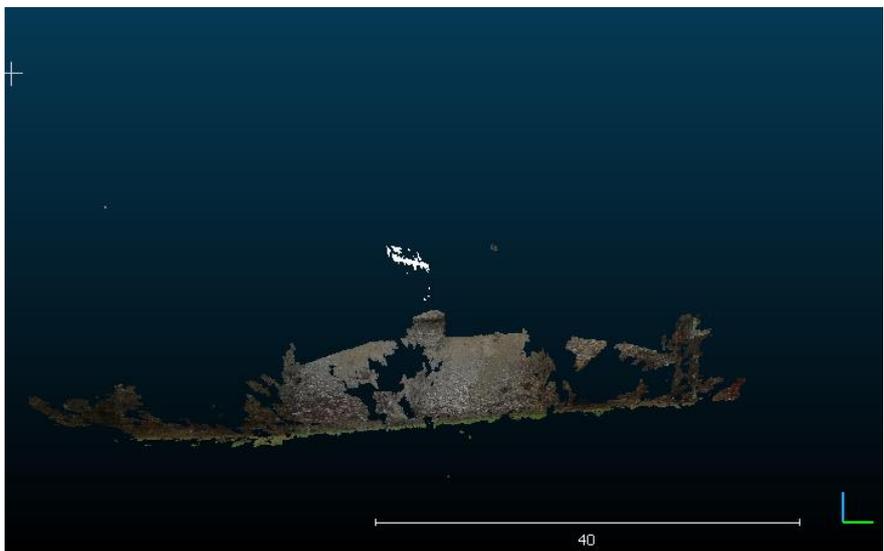
4 - 2018 - Albris + Olympus – 4 643 486 points



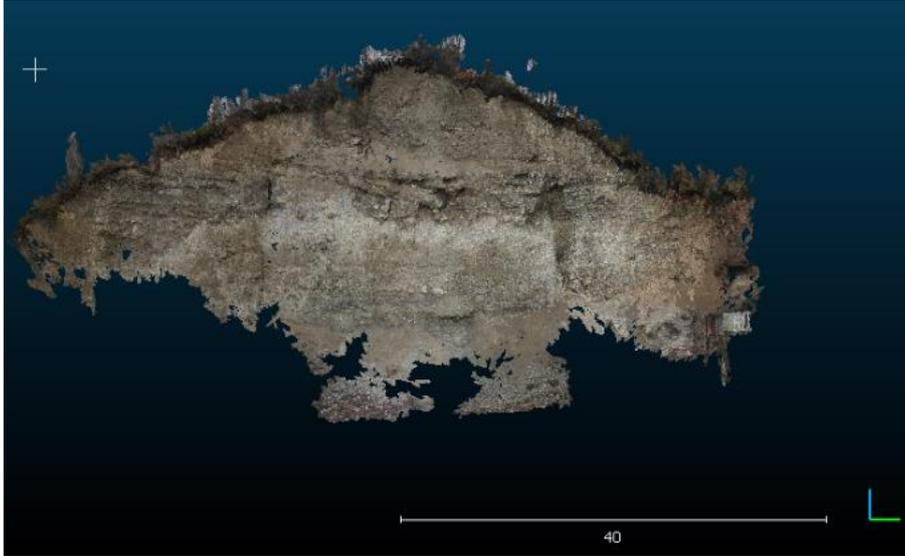
5 - 2018 - Rodéon 2 stations – 792 913 points



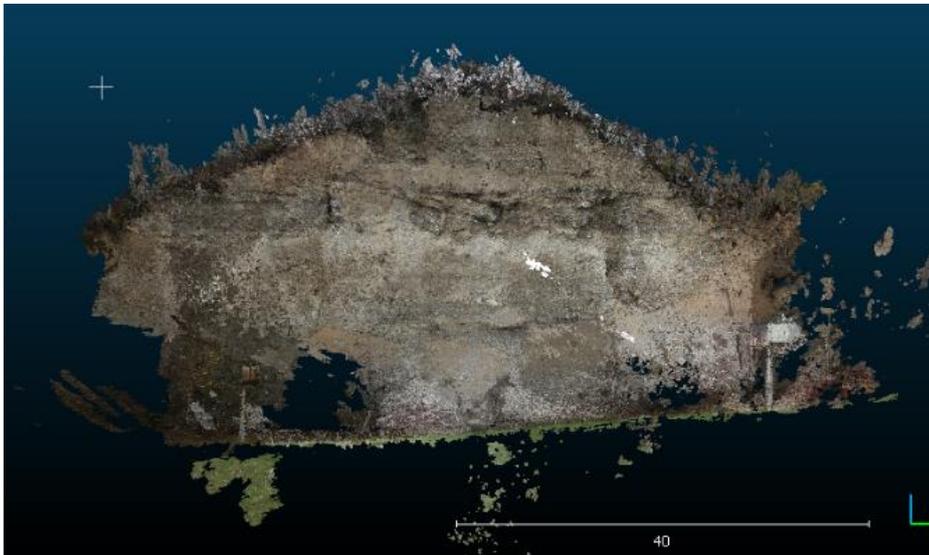
6 - 2018 - Rodéon 2 stations – 2 971 264 points



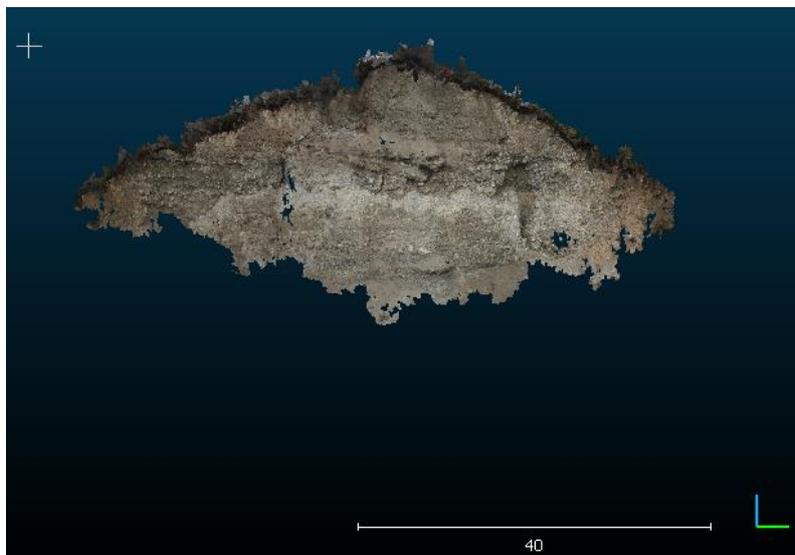
7 - 2018 - Rodéon 6 stations – 3 693 849 points



8 - 2018 - Rodéon 6 stations – 35 896 887 points



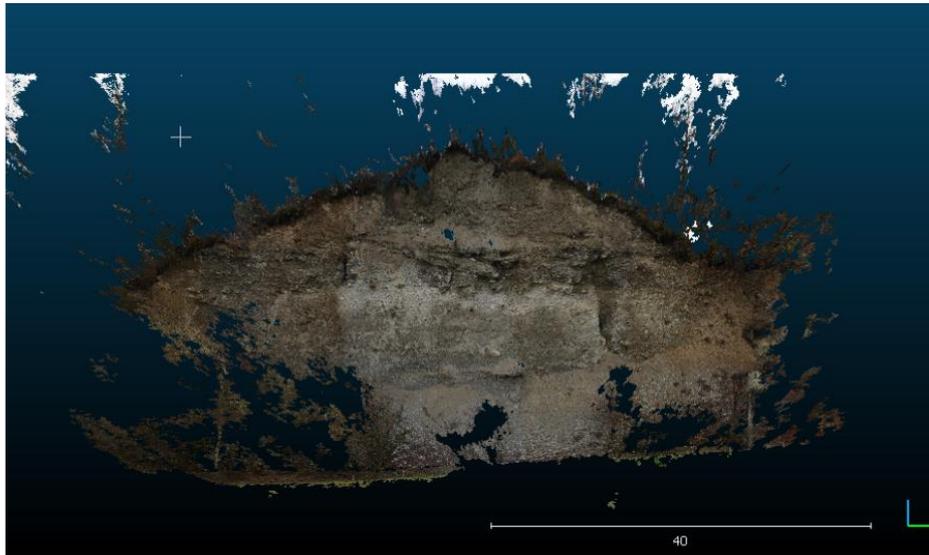
9 - 2018 - Rodéon 6 stations - 9520859 points



# Annexe 5

## Visualisation des nuages générés sur Agisoft

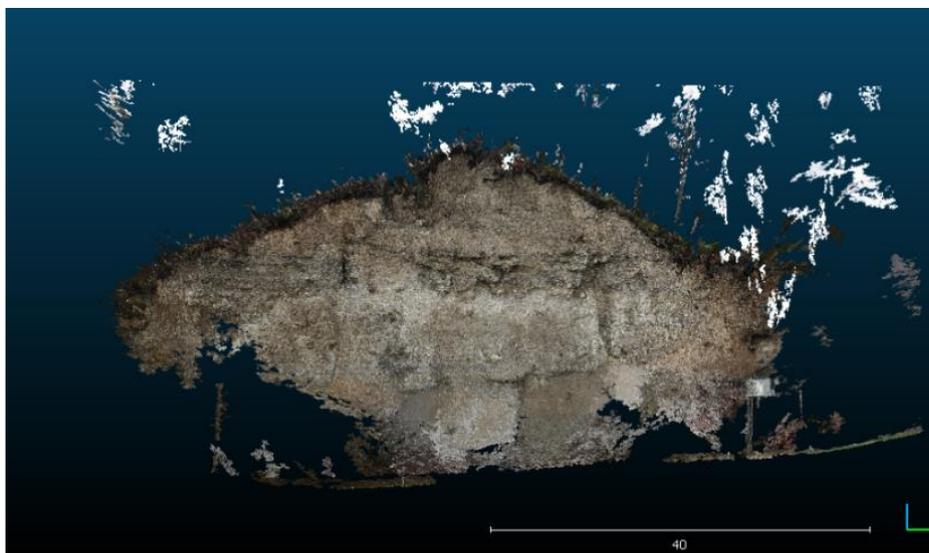
10 - 2018 - Rodéon 2 stations - 3 891 494



11 - 2018 - Rodéon 2 stations - 1 096 350



12 - 2018 - Rodéon 6 stations - 6 168 850



**Annexe 6**  
**Tableau de comparaison des nuages générés sur Pix4D et Agisoft**

n° du nuage associé	Date	Technique	Logiciel	Nb. d'image	GSD (cm)	Géoréférencement : RMS 3D (cm)	Nb de GCP utilisés pour le géoréférencement	Paramétrage				Densité	Temps
								Taille d'image pour l'extraction des points clés	Taille d'image utilisée pour la densification	Densité de points	Nb. minimum de correspondance	Nombre de points 3D	Total : processus initial et génération du nuage
1	2017	Albris	Pix4D	220	0,41	1,5	8	1	multiscale, 1/2	Optimal	4	24 860 178	0:00:00
2	2018	Albris		157	0,52	2,3	8	1	multiscale, 1/2	Optimal	4	14 709 702	3 h 18 min 55 s
3	2018	Olympus		340	1.4	2.6	8	1	multiscale, 1/2	High (slow)	6	6 424 865	6:01:10
4	2018	Albris-Olympus		497	1.17	2.8	8	1	multiscale, 1/2	Low(Fast)	4	4 643 486	7:57:50
5	2018	Rodéon - 2 stations		6	1.23	2.6	9	1	multiscale, 1	Optimal	2	792 913	0:00:50
6	2018	Rodéon - 2 stations		6	1.23	2.6	9	1	multiscale, 1	High (slow)	2	2 971 264	0:01:47
7	2018	Rodéon - 6 stations		19	1.18	1.6	14	1	multiscale, 1	Optimal	3	3 693 849	0:14:15
8	2018	Rodéon - 6 stations		19	1.18	1.7	14	1	multiscale, 1	High (slow)	2	35 896 887	0:30:15
9	2018	Rodéon - 6 stations		19	1.18	1.7	14	1	multiscale, 1	High (slow)	4	9 520 859	0:12:15
10	2018	Rodéon - 2 stations	Agisoft	6	1.08	6.7	8			Haute		3 891 494	0:00:12
11	2018	Rodéon - 2 stations		6	1,22	8,3	8			Moyenne		1 096 350	0:00:12
12	2018	Rodéon - 6 stations		19	9,49	3,3	11			Haute		6 168 850	0:02:09

## Liste des Figures

Figure 1 : Exemple d'une chute de blocs en pied de falaise à Lavey-les-bains, 2018.....	9
Figure 2 : Exemple d'un éboulement sur la plaque tournante CFF à Vallorbe, Décembre 2010.....	9
Figure 3 : Caractérisation des éléments en fonction de leur volume.....	10
Figure 4 : Falaise de Veytaux.....	11
Figure 5 : Monts d'Arvel .....	11
Figure 6 : Rocher de Toveyres .....	11
Figure 7 : Falaise et glissement d'Ollon.....	12
Figure 8 : Falaise de Bex.....	12
Figure 9 : Falaise de Lavey-les-Bains .....	12
Figure 10 : Rocher de Toveyres, présence d'un treillis métallique plaqué et cloué .....	12
Figure 11 : Acquisition d'une zone selon une trame régulière à droite, à gauche l'augmentation de l'empreinte laser.....	14
Figure 12 : chaîne de traitement photogrammétrique classique .....	15
Figure 13 : Carte de localisation, fond de plan : carte nationale Swisstopo, source : <a href="http://www.geo.vd.ch">www.geo.vd.ch</a> .....	19
Figure 14 : Site de la falaise de Bursins, source : photographie personnelle .....	19
Figure 15 : TLS Faro Focus 3D X330 Source : <a href="http://www.hkd-geomatique.com/technologies">www.hkd-geomatique.com/technologies</a> .....	20
Figure 16 : Principe de recalage "nuage-nuage" et de géoréférencement avec l'utilisation de points "durs".....	21
Figure 17 : Acquisition de photographie de manière classique.....	23
Figure 18 : Configuration de photogrammétrie terrestre de manière classique .....	23
Figure 19 : Configuration de photogrammétrie terrestre en mode "Panoramique" .....	24
Figure 20 : Acquisition de photographie d'un seul point de vue .....	24
Figure 21 : Bras motorisé Rodéon Pixpert monté sur trépied .....	24
Figure 22 : Acquisition par photogrammétrie aérienne.....	25
Figure 23 : Nuage de points Albris 2018 généré sur Pix4D.....	26
Figure 24 : Nuage de points Olympus 2018 généré sur Pix4D .....	26
Figure 25 : Nuage de points Rodéon 2 stations généré sur Pix4D .....	27
Figure 26 : Nuage de points Rodéon 6 stations généré sur Pix4D .....	27
Figure 27 : Nuage de points Rodéon 2 stations généré sur Agisoft .....	28
Figure 28 : Nuage de points Rodéon 6 stations généré sur Agisoft .....	28
Figure 29 : Mauvais pointage d'un élément naturel sur Pix4D.....	29
Figure 30 : 1re étape pour le calcul M3C2.....	31
Figure 31 : 2e étape pour le calcul M3C2 .....	31
Figure 32 : Étude des normales avec une orientation préférentielle .....	32
Figure 33 : Avant (à gauche) et après (à droite) réorientation des normales.....	32
Figure 34 : Calcul des normales avec $D/2 = 50$ cm.....	33
Figure 35 : Vues rapprochées de la surface avec les normales calculées.....	33
Figure 36 : Schéma des calculs M3C2 réalisés .....	35
Figure 37 : Illustration des zones étudiées .....	35
Figure 38 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	36
Figure 39 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	38
Figure 40 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	39
Figure 41 : Illustration de la méthode ICP .....	43
Figure 42 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	44
Figure 43 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	45
Figure 44 : Courbe de répartition des distances M3C2 et tableau des éléments gaussiens .....	46
Figure 45 : Analyse de la volumétrie - Géoréférencement en 2017 et 2018.....	47
Figure 46 : Analyse de la volumétrie - Géoréférencement en 2017 et ICP en 2018.....	47
Figure 47 : Photographies d'illustration du glissement d'Ollon.....	48
Figure 48 : Plan de situation réalisé par le bureau CSD Ingénieurs, Constat de situation de danger réalisé le 22 Janvier 2018, Dario Carrea et Renaud Chantry.....	48
Figure 49 : Configuration des stations effectuées à Ollon .....	49

Figure 50 : Graphique des vecteurs de variation sur chacun des points de contrôle relevés, réalisé sous python.....	51
Figure 51 : Comparaison du "calcul de la distance selon la normale" pour la détection de changement et le calcul de "déplacement" 3D pour les mouvements de terrain. Source : M-A Chanut, Cerema Centre Est, Colloque SFPT, Mars 2017.....	52
Figure 52 : Proposition d'une maquette d'interface et d'insertion des éléments détectés dans une base de données .....	56

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des contraintes selon les sites.....	13
Tableau 2 : Tableau de confrontation des méthodes exploitables dans le cadre d'une modélisation tridimensionnelle .....	17
Tableau 3 : Résultat de l'écart X, Y, Z entre les coordonnées vraies et les celles calculées pour le pointage .....	29
Tableau 4 : Placement du pic maximal d'occurrence des distances .....	37
Tableau 5 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les méthodes de 2018 sur le nuage complet nettoyé de la végétation.....	40
Tableau 6 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les autres méthodes sur une zone constituée d'éléments éboulés. ....	41
Tableau 7 : Comparaison des éléments émanant du calcul de volume entre le drone Albris de 2017 et les méthodes de 2018 sur une zone de plus grande envergure .....	42
Tableau 8 : Résultats des valeurs RMS concernant le recalage ICP pour chacune des méthodes ...	43
Tableau 9 : Analyse détaillée des histogrammes de fréquence d'apparition des distances à l'aide du pic maximal – Zone complète .....	44
Tableau 10 : Écarts (dx, dy, dz) sur chacun des points de contrôle. Les points "10_ _" sont ceux levés le long du glissement, les points "20_ _" sur la falaise. ....	51

## Résumé

Différentes expérimentations ont montré le potentiel de la **photogrammétrie**, moyen simple et peu onéreux, pour la modélisation tridimensionnelle des milieux naturels à structures complexes et la détection des **instabilités** liées aux **parois rocheuses**. L'engagement d'un appareil photographique accompagné d'un bras motorisé offre la possibilité d'acquisition rapide et efficace sur le terrain, ainsi que des temps de restitution et de traitements totalement optimisés. Des mesures tachéométrique sur des cibles naturelles telles que des pierres distribuées le long de la paroi permettent le géoréférencement du nuage de points lors de la première mission uniquement. Les différentes études ont montré la robustesse de la **méthode ICP**, mise en œuvre pour le calage des nuages d'époque postérieure. La simple mise à l'échelle du nuage de points à l'aide d'une mire graduée, par exemple, reste à expérimenter, simplifiant davantage la méthode. **Les phénomènes naturels gravitaires** entre deux prises de mesures peuvent être décelés, rapidement et de manière fiable, en utilisant la comparaison diachronique des nuages de points. Cette détection robuste, opérée vectoriellement, est mise en œuvre avec l'algorithme M3C2 (Lague, Brodu et Leroux 2013) sur le logiciel libre CloudCompare. Ainsi, avec le suivi d'une démarche rigoureuse, les acquisitions peuvent être directement pratiquées par les professionnels intéressés. Les traitements seront exécutés par les personnes compétentes par la suite. Cependant, le rendu des données reste complexe puisqu'un véritable manque subsiste au niveau des logiciels pour l'extraction et l'archivage des éléments. Une proposition de développement d'outils est donc effectuée, pouvant être réalisée par d'autres projets d'étudiant, ou professionnel.

**Mots clés : Dangers naturels, dangers gravitaires, falaise, chutes de pierres et de blocs, éboulements, géoréférencement, ICP, photogrammétrie, lasergrammétrie, méthodologie.**

---

## SUMMARY

Many testing shown **photogrammetry** potentials, simple and inexpensive method, for three-dimensional modeling of natural environment with complex structure, and **cliff instabilities** detection. The use of camera and motorized arm enable fastly and efficiently field data acquisitions as well optimize restitution and processing times. The tacheometric measurements on natural targets like stones distributed along rock face make it possible to georeference point cloud only during the first mission. Many studies shown **ICP method** robustness, used for the points clouds registration at later dates. A simple cloud scaling with optical grade rods for example, can be experiment for even more simply method. **Gravitational natural phenomenon** between two different measurements periods can be detected, quickly and reliably, with cloud diachronic comparison. This robust detection in vector mode is executed with M3C2 algorithm (Lague, Brodu and Leroux 2013) on free software CloudCompare. Thus, with the follow-up to strict protocol, acquisitions can be realized by concerned professionals. Thereafter data processing are executed by skilled person. However data rendering is complex because a real lack subsisted on software for elements extraction and storage. Tools development proposition is made and can be processed by student or professional projects.

**Key words : Natural hazards, gravitational hazards, cliff, falling rocks and blocks, georeferencing, ICP, photogrammetry, lasergrammetry, methodology.**