Interreg
France-Wallonie-Vlaanderen
UNION EUROPÉENNE
EUROPESE UNIE

RISSC

Synthèse de la méthode de surveillance de la carrière de la Malogne par scan 3D

1er décembre 2021

Timothée DEFFRENNE - Catherine PINON

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable

Ce rapport a été rédigé dans le cadre du module 4, activité 2 du projet Interreg RISSC.

PRÉAMBULE

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

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

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

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

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION 4
A. Contexte de l'étude 4
B. Présentation du site de la Malogne 4
C. Principe de fonctionnement du scanner laser 3D utilisé 7
2 MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE 8
A. Principe de la méthode de surveillance par scanner laser 3D 8
B. Paramètres à prendre en compte sur le terrain 9
1. Positionnement des stations 9
2. Résolution identique 9
C. Traitement des données 9
1. Recalage des stations 9
2. Adaptation de l'échelle lors de la comparaison 11
3 SYNTHÈSE DES DONNÉES DE COMPARAISON 11
4 CONCLUSIONS 13

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la carrière de la Malogne, des enjeux associés et de l'effondrement survenu en 2015 5
Figure 2 : Localisation de la zone (en rouge) choisie pour la surveillance par scanner laser 3D 6
Figure 3 : Visualisation de la numérisation 3D de la carrière de la Malogne 7
Figure 4 : Scanner laser 3D FARO Focus3D X330 utilisé pour les tests de surveillance 7
Figure 5 : Schéma de principe d'utilisation du scanner laser 3D dans le cas de plusieurs stations (en jaune les cibles visibles par les deux stations) 8
Figures 6 : Vue en plan du nuage de points 3D assemblés de 2021 et vue en coupe du nuage de points 3D assemblés de 2019 10
Figures 7 : Assemblage puis comparaison des deux nuages de points 3D 10
Figure 8 : Illustration des écarts liés à l'incertitude du positionnement des stations entre les deux campagnes de mesures. 11
Figure 9 : Anomalies écartées (station 11) 12
Figure 10 : Dépôt visible sur la station 1 12
Figure 11 : Déplacements de petits blocs entre 2019 et 2021 (station 7) 13

Résumé :

Réalisée dans le cadre du projet Interreg RISSC, cette étude présente une méthode de surveillance en trois dimensions au travers d'une expérimentation menée sur deux ans dans la carrière de la Malogne à Mons en Wallonie. En effet, l'identification des évolutions d'une carrière souterraine est un réel enjeu dans la prévention et l'analyse des risques géotechniques qui y sont liés.

La méthode mise en œuvre utilise la comparaison de nuages de points 3D pour permettre d'identifier les déplacements survenus entre deux campagnes de mesures réalisées en 2019 et 2021. L'objectif est de pouvoir localiser et visualiser les dégradations et notamment les chutes de blocs à l'échelle d'un site.

La comparaison des nuages de points 3D effectivement réalisée a révélé que l'état géotechnique général de la zone d'étude dans la carrière de la Malogne ne s'était pas dégradée entre 2019 et 2021. Seule une coulée boueuse, liée à d'importantes venues d'eau dans la carrière, qui a recouvert une partie du sol d'une galerie et des traces de l'activité humaine (petits blocs déplacés suite à des visites) ont été mises en évidence par cette comparaison. Les toits (en particulier au droit de la montée de voûte) et parements ne montrent pas de signe d'évolution.

La méthode de comparaison de nuages de points apporte donc des éléments d'analyse au suivi et à la surveillance de l'état géotechnique des cavités souterraines ; elle comprend néanmoins quelques limites (détection de dégradations infracentimétriques) et les résultats doivent être interprétés par un expert géotechnicien. Par ailleurs, cette méthode se veut être complémentaire aux autres méthodes et systèmes de mesures et de surveillance en temps réel.

Mots-clés :

Géotechnique, Carrières souterraines, Craie, Surveillance.

Pour citer ce document :

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Synthèse de la méthode de surveillance de la carrière de la Malogne par scan 3D - Module 4, activité 2 du projet Interreg RISSC, Verneuil-en-Halatte, Ineris – 174384 – 2726261.

1 INTRODUCTION

A. Contexte de l'étude

La Wallonie et la région des Hauts-de-France comportent sur leur territoire de nombreuses cavités souterraines d'origine anthropique (mines, carrières...) et naturelle (karsts...), qui représentent souvent une menace à l'égard de la sécurité des personnes, des biens immobiliers, des projets d'aménagement et l'attractivité socio-économique de certains territoires.

Les politiques publiques de prévention et de gestion des risques du sous-sol, des deux côtés de la frontière franco-belge, visent des objectifs communs mais mettent en œuvre des outils différents et perfectibles.

C'est pourquoi le projet RISSC du programme Interreg vise à réaliser un retour d'expériences des différents modes de gestion mis en œuvre en France et en Belgique afin de les améliorer et de permettre la mise à disposition d'outils en matière de sécurité, d'aménagement du territoire, ainsi que dans le domaine de la prévention et gestion d'incidents[1].

Neuf partenaires dont l'Ineris, participent à ce programme de recherche européen.

L'identification des évolutions d'une carrière souterraine est un réel enjeu dans la prévention et l'analyse des risques géotechniques. Traditionnellement, la surveillance de carrières souterraines est réalisée de plusieurs manières : visuellement d'une part (les visites répétées d'un même site permettent de s'en approprier ses caractéristiques géotechniques et de détecter les éventuelles évolutions) ; en utilisant des capteurs d'autre part (extensomètres, microphones, sondes microsismiques...) qui permettent une analyse très précise des mouvements d'une carrière en temps réel. Pourtant, ces méthodes ont chacune leurs limites. En effet, la surveillance visuelle n'est pas exhaustive (car elle se limite à la mémoire et à l'œil de l'opérateur) et il est très difficile parfois d'affirmer qu'une évolution est survenue. Dans le cas de la surveillance avec des capteurs géotechniques, il s'avère souvent compliqué de détecter avec précision la localisation d'un évènement.

Dans le cadre du projet RISSC, l'Ineris a mis en place depuis 2019 un test de surveillance par relevés scanner laser 3D d'une zone de la carrière souterraine de la Malogne située sur le territoire de la ville de Mons en Belgique. C'est l'objet de la présente note. En parallèle, une campagne de photogrammétrie a été réalisée par le Cerema sur cette même zone.

B. Présentation du site de la Malogne

La carrière de la Malogne est située dans le Bassin de Mons en Wallonie, dans le prolongement du Bassin de Paris. Elle s'étend sur une superficie de 67 ha et est proche d'importantes infrastructures (voie ferrée Paris-Bruxelles, autoroute R5) et de zones résidentielles (Figure 1).

[1] Rapport Ineris « DRS-18-174377-Descriptif-INTERREG_RISSC »

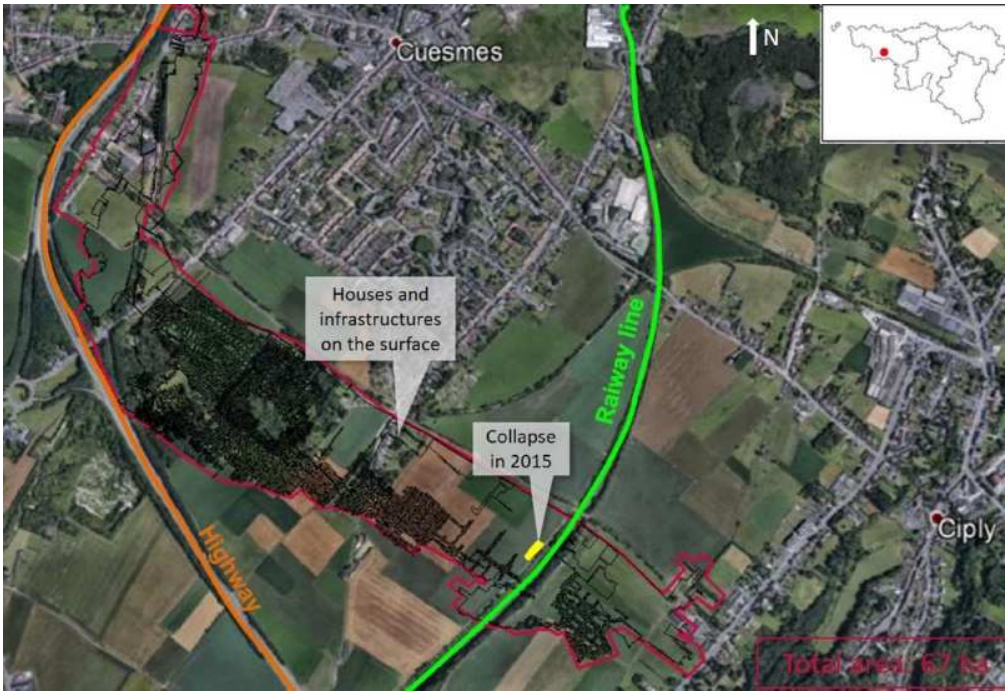


Figure 1 : Localisation de la carrière de la Malogne, des enjeux associés et de l'effondrement survenu en 2015[2]

Ce site a fait l'objet d'une exploitation par la méthode des chambres et piliers de la craie phosphatée entre 1873 et les années 50 à faible profondeur (20 à 30 m). Cette formation datant du Maastrichtien est intercalée entre la craie blanche du Campanien au mur et un hardground de 60 cm en moyenne au toit. Ce dernier est recouvert de tuffeau puis de terrains meubles (sables et argiles du Thanétien au Pléistocène).

Le taux de défruitement varie de 60 à 70 % et certaines parties ont été remblayées partiellement avec des schlamms en cours d'exploitation, avant d'être déblayées par la suite. Concernant le contexte hydrogéologique, la Malogne est soumise aux battements du niveau de la nappe qui varie au cours des saisons. Ainsi une partie des piliers résultants de l'exploitation peuvent être soumis à des cycles de saturation-séchage et voir leur état se dégrader davantage.

La géométrie des chambres et piliers est assez irrégulière, en lien avec les conditions hydrogéologiques et l'historique de l'exploitation.

Cela crée un contexte favorable aux instabilités, tant au niveau des cavités souterraines qu'en surface. Pendant et après l'exploitation, plusieurs effondrements significatifs ont été enregistrés, dont le dernier, en 2015, a eu des répercussions en surface sur une surface d'1,2 ha.

[2] Temenuga GEORGIEVA (2019). *Mechanical characterization of phosphatic chalk in the framework of the stability assessment of Malogne underground quarry* – Thèse. Polytech Mons - Académie universitaire Wallone-Bruxelles.

Sur ce site de la carrière de la Malogne, site de référence wallon pour la réflexion sur les modes de suivi des dégradations du projet RISSC, aucune instrumentation ne peut être installée à demeure (accès encore ouverts et risque de vandalisme pour le matériel). Il a donc été choisi de ne procéder qu'à des campagnes de mesures ponctuelles sans pose de capteurs.

Dans ce contexte, il a été décidé de mettre en place un dispositif de diagnostic innovant basé sur la comparaison de campagnes de mesures, faites par scanner laser 3D terrestre, d'une même zone de la carrière. Cette dernière, d'une superficie d'environ 3 500 m² (Figure 2), comprend notamment une montée de voute susceptible d'évoluer.

Une première intervention a eu lieu en octobre 2019 et constituait l'état zéro de la surveillance par scanner laser 3D. Une seconde campagne a été réalisée en juillet 2021 (pas de campagne sur site en 2020 en raison des restrictions sanitaires liées à la Covid).

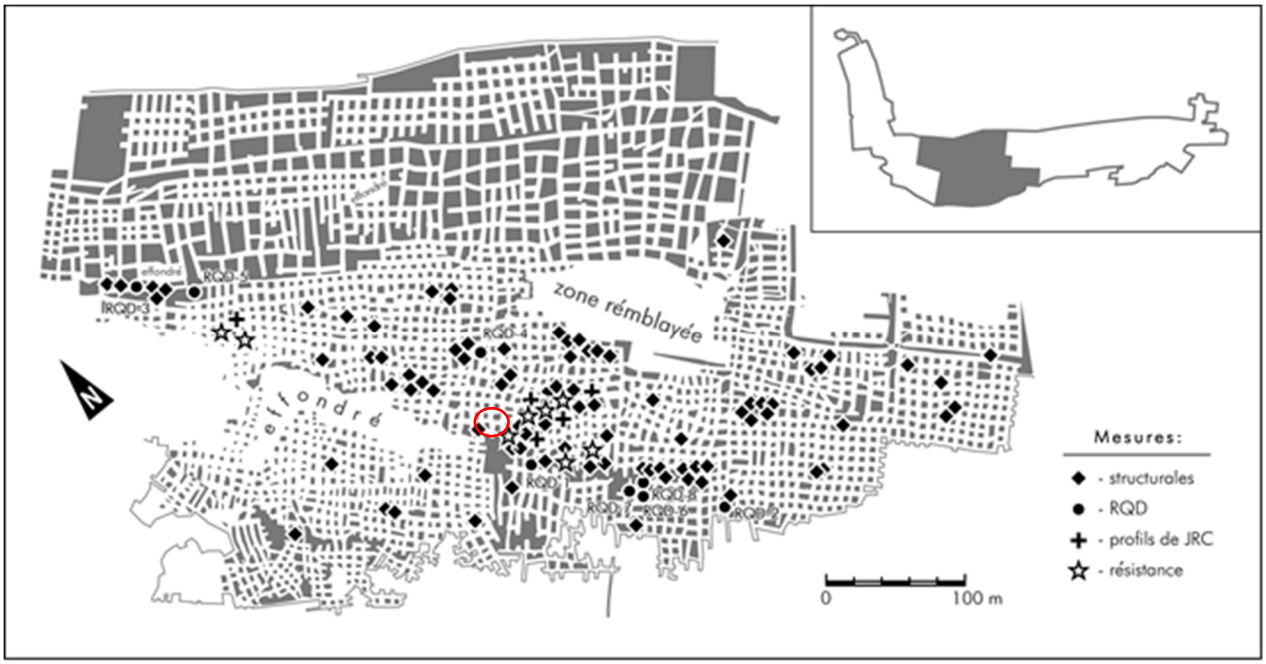


Figure 2 : Localisation de la zone (en rouge) choisie pour la surveillance par scanner laser 3D[3]

[3] Temenuga GEORGIEVA (2020). *Caractérisation géomécanique d'une carrière souterraine abandonnée par des mesures in-situ – Rapport de synthèse* – Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (Lyon 2020).

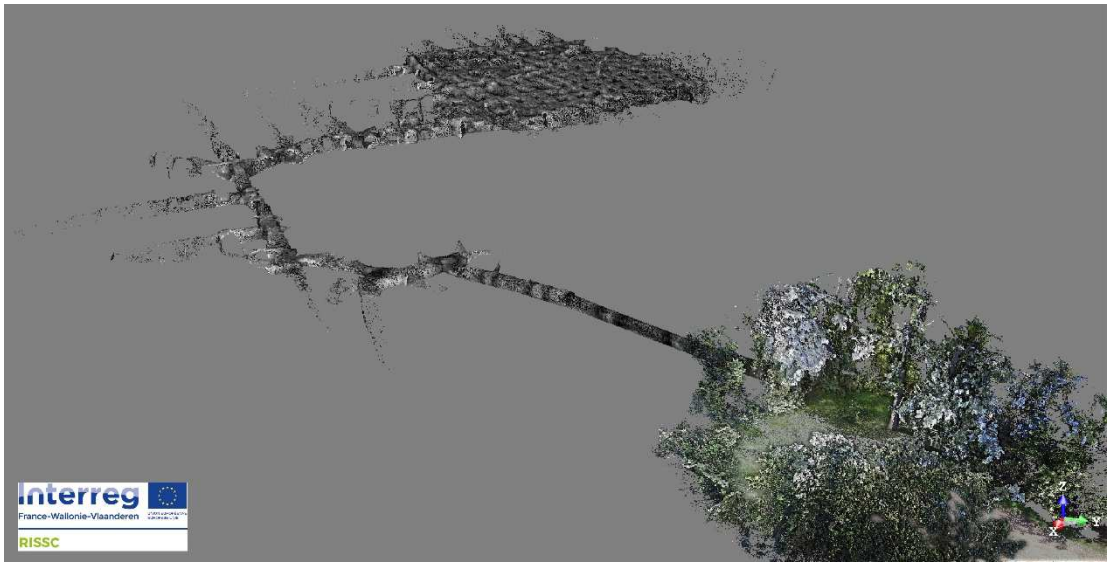


Figure 3 : Visualisation de la numérisation 3D de la carrière de la Malogne

C. Principe de fonctionnement du scanner laser 3D utilisé

L'appareil utilisé dans le cadre de cette étude est un Scanner Laser Terrestre appartenant à l'Ineris (Figure 4). Cet appareil, d'une portée de 300 m environ, a été utilisé car il est très autonome et relativement léger. D'autre part, il a un taux de scan de l'ordre de 900 000 pts/sec ce qui permet de limiter les temps de mesures sur site.

Figure 4 : Scanner laser 3D FARO Focus3D X330 utilisé pour les tests de surveillance

Le scanner laser 3D émet un faisceau laser qui est ensuite réfléchi sur une surface puis renvoyé directement à l'appareil. Ainsi, la distance et les coordonnées du point d'impact peuvent être calculées. En multipliant des millions de fois et sur 360° ces mesures de distance, un nuage de points 3D est obtenu.

Pour numériser une cavité d'extension importante en trois dimensions, il est souvent nécessaire de réaliser plusieurs stations (Figure 5). En effet, l'appareil posé sur son trépied numérise uniquement l'environnement « visible » (détectable par le faisceau laser). Dans le cas où une salle ou une galerie n'est pas directement visible par le scanner, il est nécessaire de déplacer le scanner sur une autre position afin de réaliser une seconde station et ainsi de suite. La multiplication des stations permet ainsi de minimiser les « zones d'ombres ». Ces dernières correspondent aux zones non couvertes par le faisceau laser et sont principalement liées à la présence d'obstacles. Le repositionnement des stations est ensuite réalisé

automatiquement grâce à des repères ou des cibles normalisées (sphères de diamètre 139 mm utilisées pour cette étude), visibles à partir de plusieurs stations.

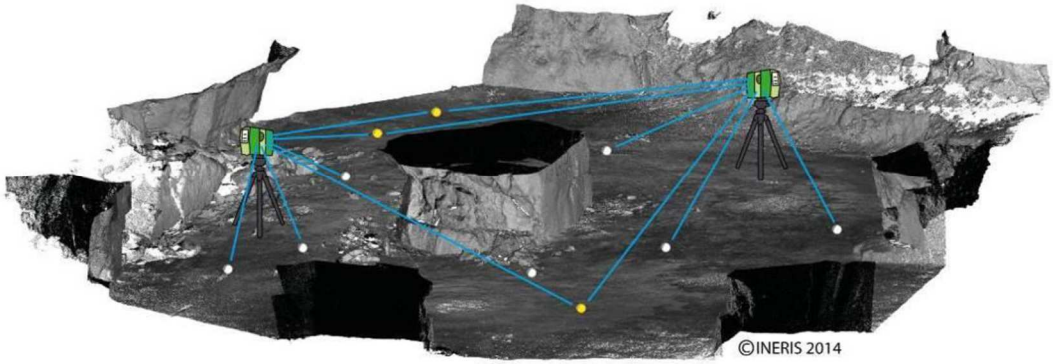


Figure 5 : Schéma de principe d'utilisation du scanner laser 3D dans le cas de plusieurs stations (en jaune les cibles visibles par les deux stations)

2 MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

A. Principe de la méthode de surveillance par scanner laser 3D

Le scanner laser 3D permet d'obtenir une « image de référence » en 3D de l'espace à un instant donné.

Dans le cas où plusieurs mesures successives et similaires sont réalisées sur un même site, il est possible d'évaluer les écarts entre les nuages de points respectifs. Ainsi, dans le cas d'une carrière souterraine, si un bloc provenant du toit chute entre les deux périodes de mesures, alors il apparaîtra un écart de la taille de ce bloc entre les deux nuages.

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait de pouvoir comparer des nuages de points très denses et de pouvoir localiser précisément un évènement survenu dans l'espace, quelle que soit sa localisation (au toit ou sur un pilier par exemple).

La surveillance par scanner laser 3D comprend les étapes suivantes :

- la numérisation 3D du site (sur deux périodes successives) ;
- la comparaison entre les deux nuages de points relevés ;
- la visualisation et l'interprétation des écarts entre les nuages de points.

B. Paramètres à prendre en compte sur le terrain

1. Positionnement des stations

Pour effectuer une surveillance la plus fiable et précise possible, il est important de comparer strictement les mêmes nuages de points 3D.

Ainsi, lors de la 1ère campagne de scan réalisée en 2019, la position de chacune des 12 stations a été marquée au sol au moyen d'un clou d'arpentage et la hauteur du laser a été relevée.

Le positionnement des stations entre deux campagnes de mesure engendre une incertitude. Celle-ci dépend de la manière et de la méthode avec laquelle les stations ont été repositionnées aux mêmes positions, elle est donc difficile à évaluer avec précision. Toutefois, elle peut être importante, jusqu'à 10 cm.

2. Résolution identique

Pour chaque campagne de mesure, la même résolution a été utilisée pour l'ensemble des stations dans le but obtenir une densité de points identique entre les deux périodes. La résolution spatiale utilisée est de 1 points/6 mm pour un espacement de 10 m de distance entre chaque station.

C. Traitement des données

1. Recalage des stations

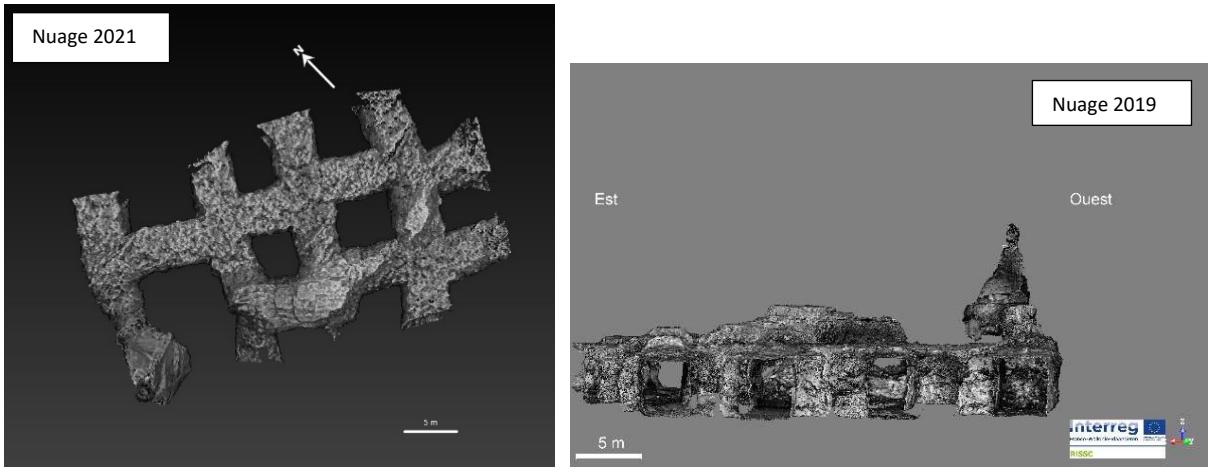
Cette étape consiste à assembler l'ensemble des stations relevées sur le site pour obtenir un unique nuage de points 3D de la carrière (Figures 6). Il existe deux méthodes pour réaliser cet assemblage :

- **le recalage à partir de cibles**. Il peut se faire de manière automatique par le logiciel de traitement (RealWorks® ici en l'occurrence) ou « manuellement » si ce dernier ne reconnait pas les cibles visibles entre deux stations ;
- **le recalage par nuages de points**. L'assemblage se fait alors en superposant des parties identiques du nuage de points ; l'angle d'un pilier par exemple. Cette dernière méthode nécessite toutefois un recouvrement important des nuages de points entre chaque station.

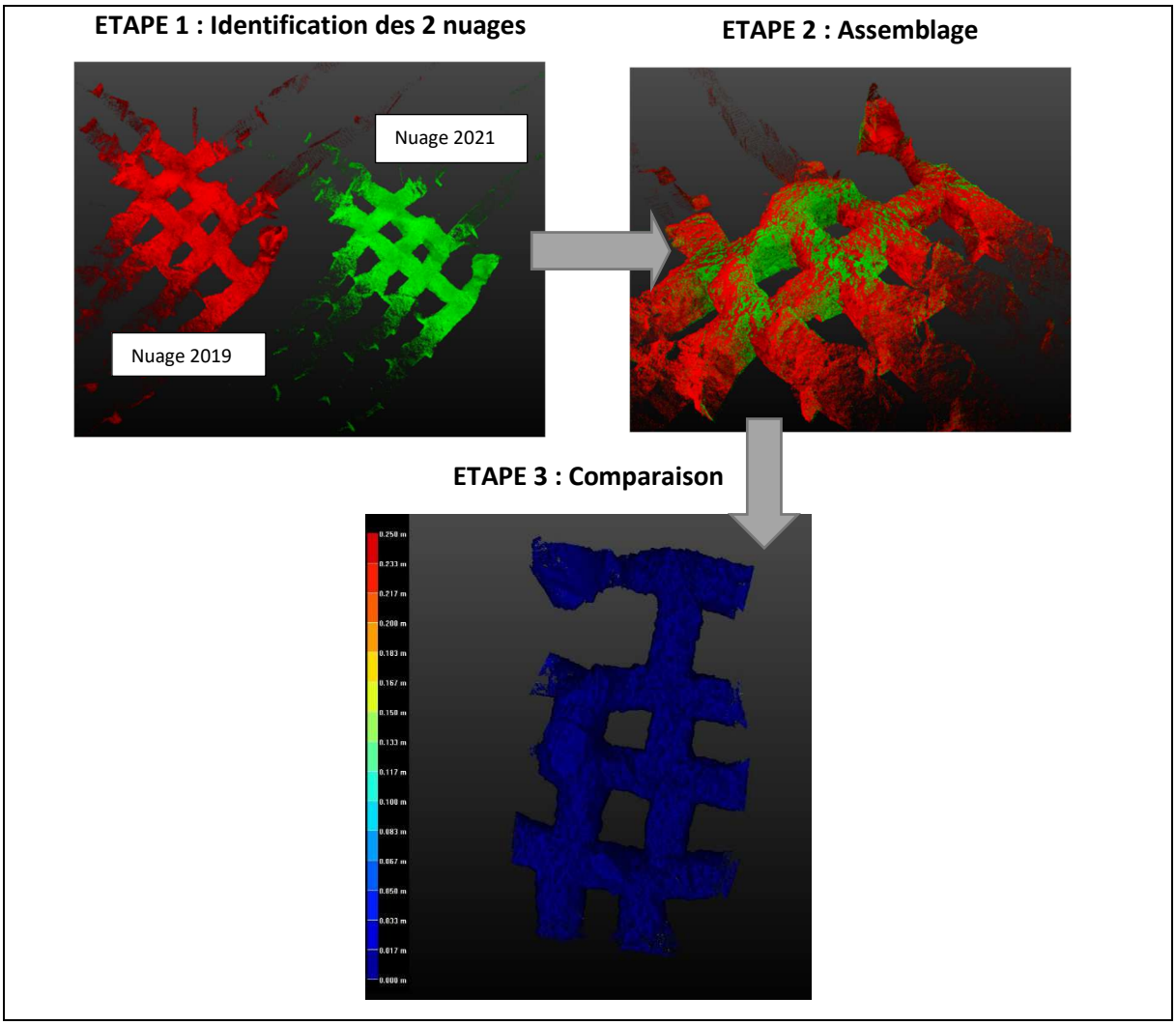
Le prétraitement génère une erreur d'assemblage qui est généralement d'ordre millimétrique (de 1 à 5 mm selon les relevés et les méthodologies d'assemblage utilisées). Lors des deux campagnes réalisées en 2019 et 2021, les stations ont été assemblées en utilisant des cibles sphériques de diamètre 139 mm. Cette méthode a généré des erreurs résiduelles de l'ordre de 1,5 mm (Figures 6).

Le logiciel de traitement de nuages permet de comparer des nuages de points 3D entre eux de manière automatique. Lors de cette étape, il va calculer les distances qui séparent chaque point. Pour cela, les deux nuages de points à comparer ont d'abord été assemblés comme s'il ne s'agissait que d'un seul (Figures 7). Le recalage par nuages de points a été privilégié étant donné que les cibles n'ont pas été placées au même endroit entre les deux campagnes de

numérisation. L'erreur résiduelle générée lors de cette étape est de 1,7 mm.



Figures 6 : Vue en plan du nuage de points 3D assemblés de 2021 et vue en coupe du nuage de points 3D assemblés de 2019



Figures 7 : Assemblage puis comparaison des deux nuages de points 3D

2. Adaptation de l'échelle lors de la comparaison

Au cours de l'étape de la comparaison, le choix de l'échelle est un paramètre à prendre compte concernant la détection des écarts entre les deux nuages de points. En effet, si une échelle trop importante est choisie, les écarts ne seront pas tous détectés lors de la comparaison. A l'inverse, si une échelle trop fine est privilégiée, la comparaison détectera de nombreux écarts qui n'ont pas de liens avec d'éventuels mouvements de terrain. La Figure 8 illustre bien ce dernier cas avec une comparaison de nuages effectuée sur une échelle comprise entre 0 et 1 cm. En effet, de nombreux écarts de taille pluri-millimétrique sont visibles sur certains piliers. Ils sont liés à des phénomènes de zones d'ombres car le scanner n'a pas été parfaitement positionné à la même hauteur lors des deux campagnes. L'incertitude liée au positionnement des stations est pluri-centimétrique (voir paragraphe Positionnement des stations).

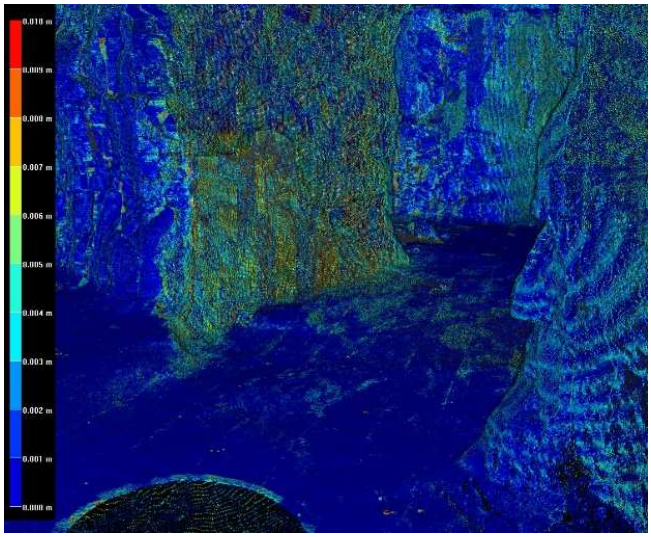


Figure 8 : Illustration des écarts liés à l'incertitude du positionnement des stations entre les deux campagnes de mesures.

3 SYNTHÈSE DES DONNÉES DE COMPARAISON

Lors de l'étape de la comparaison, le logiciel a calculé la distance entre les nuages de points 2019 et 2021 (Figure 8). Tous les écarts entre ces deux nuages assemblés ont été mis en évidence. Il convient donc d'analyser ces écarts pour permettre de ne retenir que les écarts liés à de véritables mouvements (chutes de blocs par exemple). Certains d'entre eux mettent en évidence des mouvements de faible ampleur qu'il convient d'analyser pour identifier leur origine, naturelle ou anthropique. Les anomalies liées aux phénomènes de zones d'ombre et au positionnement non identique des sphères entre les deux campagnes de mesures n'ont évidemment pas été prises en compte (Figure 9).

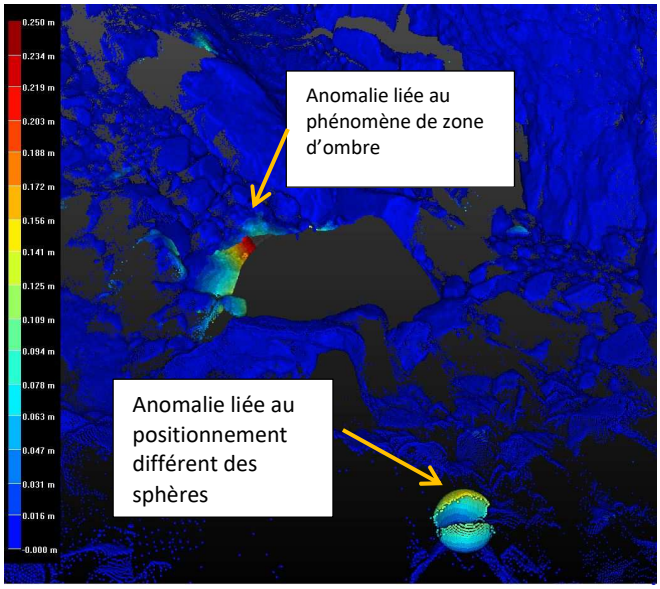


Figure 9 : Anomalies écartées (station 11)

Suite à la comparaison des deux campagnes de mesures 3D, l'état global du secteur n'a pas changé. Aucune anomalie n'a été constatée sur les parements ou le toit de la zone inspectée. Seules quelques anomalies ont été identifiées au niveau du sol de la carrière.

La première a été repérée sur la 1ère station. La Figure 10 ci-dessous montre la présence de quelques cailloux de taille pluri-centimétriques ainsi qu'un léger dépôt de matériaux plus ou moins meubles avec une épaisseur variant de quelques millimètres jusqu'à 10 cm. Cela peut être dû à d'importantes venues d'eau dans la carrière ayant pu provoquer une coulée « argileuse ». D'ailleurs, lors de la seconde campagne sur le terrain, le clou d'arpentage indiquant le positionnement de la station était recouvert de matériau.

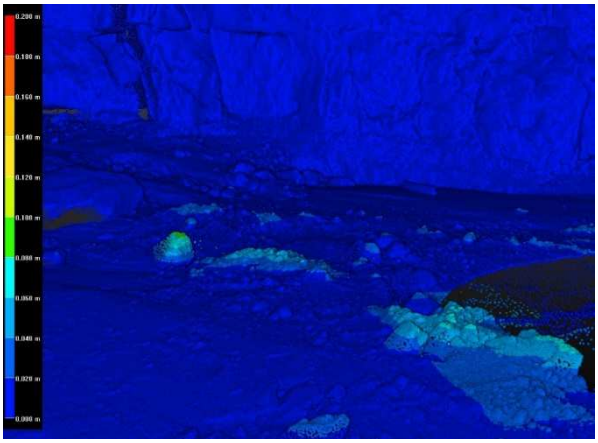


Figure 10 : Dépôt visible sur la station 1

Au niveau des stations 3, 7 et 6, quelques écarts ont été constatés au niveau du sol de la carrière. Il s'agit de rares petits blocs épars, de taille comprise entre 5 et 15 cm (Figure 11). Etant donné qu'aucun écart n'a été identifié sur les parements et le toit, il est peu probable que ces déplacements de petits blocs aient une origine naturelle. Il est possible qu'ils correspondent au passage de personnes lors de visite de la carrière.

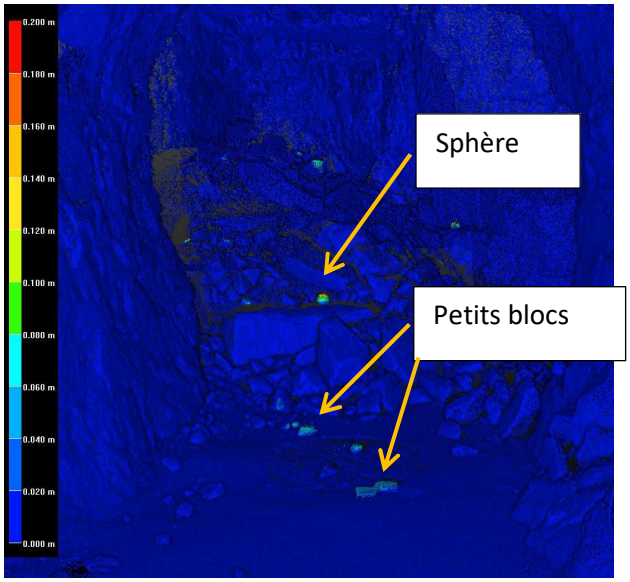


Figure 11 : Déplacements de petits blocs entre 2019 et 2021 (station 7*)*

4 CONCLUSIONS

Le scanner laser 3D permet d'avoir un visuel et une localisation précise des événements produits en souterrain.

La comparaison des nuages de points relevés en 2019 et 2021 sur une zone particulière de la carrière de la Malogne à Mons (Belgique) a permis de constater l'absence d'écarts au niveau du toit et des parements, ce qui signifie que l'état géotechnique général de la zone d'étude ne s'est pas dégradée. Seule une coulée de matériaux meubles identifiée sur la 1ère station aurait a priori une origine naturelle liée à de fortes venues d'eau dans la carrière. Les autres écarts identifiés au niveau du sol correspondent à des déplacements de petits blocs probablement liés au passage de personnes lors de visite du site de la Malogne. Les anomalies inférieures au centimètre n'ont pas été prises en compte puisqu'elles sont dues au cumul des incertitudes dans la chaine de traitement (recalages des stations et des deux nuages, incertitude du positionnement des stations entre les deux campagnes de numérisation…). En outre, la comparaison de nuages 3D ne peut pas détecter des chutes de blocs de taille infracentimétrique.

L'interprétation occupe donc une place importante dans cette méthode de surveillance et l'analyse des écarts par un géotechnicien connaissant l'espace souterrain surveillé est primordiale afin d'identifier s'il s'agit ou non de mouvements de terrain.

Ainsi, la méthode de comparaison de nuages de points apporte donc des éléments d'analyse au suivi et à la surveillance de l'état géotechnique des cavités souterraines ; elle comprend néanmoins quelques limites (détection de dégradations infracentimétriques) et les résultats doivent être interprétés par un expert géotechnicien. Par ailleurs, cette méthode se veut être complémentaire aux autres méthodes et systèmes de mesures et de surveillance en temps réel.