



Diplôme national de Master

Domaine - Sciences Exactes et Naturelles

Mention - Géoressources, Géorisques, Géotechnique

Spécialité – Archéologie des Géomatériaux, Patrimoine

## **Processus de dégradation des cavités souterraines : application de l'imagerie in situ**

Stage du 01/02/2020 au 31/07/2020

Julie Barras

Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement

Tuteur : Michel Dubois, Professeur des Universités - Université de Lille





## Remerciements

---

Je souhaiterais adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Michel Dubois, qui m'accompagne depuis la 3<sup>ème</sup> année de Licence après un premier stage ensemble. Malgré le fait que les conditions ne furent pas idéales cette année, cela a été un réel plaisir de retrouver le domaine des carrières souterraines en sa compagnie. Je tiens ensuite à remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnés, guidés et conseillés, lors de nos excursions souterraines : tout d'abord Éric Leblois, Philippe Manceaux et Nicolas Manceaux, de l'ASBL « Projet Malogne » ; Gaëtan Cheppe, Jean-Marie Boussin, Jésahel Benoist, Guillaume Faucheux et Christophe Wyffels, du Service Commun des Carrières souterraines de Lille ; Fabrice pour avoir autorisé l'accès à la carrière de sa propriété située à Fâches-Thumesnil ; la Mairie de Lezennes pour l'accès au secteur visité lors des Journées du Patrimoine. Mes remerciements également à Monsieur Arnaud Gauthier, Professeur des Universités à Lille, qui nous a apporté son aide et ses conseils pour tout ce qui concerne le matériel.



# Table des matières

---

Résumé .....	3
Abstract.....	3
Remerciements.....	5
Table des matières.....	7
Liste des tableaux et illustrations .....	9
Liste des abréviations, sigles et acronymes .....	13
Introduction.....	1
Contexte des carrières souterraines .....	1
A. Petit historique des carrières souterraines péri-urbaines.....	1
B. Processus de dégradation.....	1
C. Intérêt patrimonial.....	8
Contexte des carrières ciblées.....	11
A. Carrières de la métropole lilloise.....	11
1. Géographie et géologie régionales.....	11
2. Historique et patrimoine.....	12
3. La carrière Herriot.....	13
B. Carrière de la Malogne .....	14
1. Géographie et géologie régionales.....	14
2. Historique .....	16
Matériel et méthodes .....	19
A. L’inspection.....	19
1. Présentation des partenaires .....	19
2. Conditions de descente.....	20
B. Photogrammétrie.....	21
1. Intérêt et caractéristiques de la méthode .....	21
2. Conditions de prise de vues en milieu souterrain .....	22

3. Traitement des photos pour la reconstruction du modèle .....	23
C. Reflectance Transformation Imaging .....	24
Résultats et discussion .....	29
A. Retour sur la photogrammétrie .....	29
B. Approfondissement sur les carrières du projet .....	36
C. RTI .....	38
Conclusion .....	41
Références bibliographiques .....	43
ANNEXES .....	1
Annexe 1 : présentation des opérateurs du projet RISSC .....	1
Annexe 2 : les différents modules du projet RISSC .....	1

## Liste des tableaux et illustrations

---

Tableau 1 : liste des visites en carrières souterraines réalisées dans le cadre de ce stage.....	29
Tableau 2 : présentation des données et résultats des essais en photogrammétrie .....	30
Figure 1 : photographie de l’affaissement généralisé de Clamart (source : clamart.cyberkate.org).....	1
Figure 2 : plan des carrières de la Malogne illustrant la méthode d’exploitation par chambres et piliers (Georgieva et al., 2020).....	2
Figure 3 : plan d’une carrière de sable de Fontainebleau exploitée par galeries (source : LCPC).....	2
Figure 4 : photographie illustrant l’exploitation par hagues et bourrages (source : rapport LCPC).....	3
Figure 5 : plan des carrières de Faches-Thumesnil illustrant la méthode d’exploitation par catiches (source : Service Commun des Carrières souterraines) .....	4
Figure 6 : schéma d’une exploitation par affaissement dirigé (source : LCPC).....	4
Figure 7 : illustration de la formation d’un fontis, d’une chute de toit à sa manifestation en surface (source : <a href="https://geoderis.fr/lapres-mine/thematiques/mouvements-de-terrain/">https://geoderis.fr/lapres-mine/thematiques/mouvements-de-terrain/</a> ).....	5
Figure 8 : photographie aérienne d’un effondrement généralisé survenu aux carrières de la Malogne en 2015 (Thys, 2015 ; RISSC, 2020).....	6
Figure 9 : photographie d’une rupture de bouchon de puits (source : LCPC).....	6
Figure 10 : photographie d’un pilier en diablo, carrière de la Malogne.....	7
Figure 11 : inscription « JoS / 1754 », carrières de Lezennes .....	9
Figure 12 : inscription « Igna[ce] Du Bois / 1693 », carrière de Loos.....	9
Figure 13 : chambre où l’on pratique la culture de la barbe de capucin (Carrière de Loos).....	9
Figure 14 : panorama montrant la stratigraphie de la région de Lille. Sur la craie blanche reposent les sables verdâtres du Landénien puis les limons quaternaires (chantier situé à Villeneuve d’Ascq, à proximité du Stade Pierre Mauroy) (Photo 20/08/20) .....	12
Figure 15 : localisation de la carrière Herriot (carte créée à partir des données OpenStreetMap) .....	13
Figure 16 : situation de la ville de Mons (source : Géoportail) .....	14

Figure 17 : coupe du Bassin de Mons. A : Echelle des hauteurs exagérée 10 fois, d'après R. Marlière, 1978. B : Hauteurs sans exagération modifié (source : le Grand Mons, Itinéraires pédagogiques du Géoparc du Bassin de Mons) .....	15
Figure 18 : photographie de la nappe d'eau souterraine présente à la Malogne.....	15
Figure 19 : Hainausorus bernardi, exposé au Muséum des Sciences Naturelles de Bruxelles (source : valleedelahaine.be).....	16
Figure 20 : photographie d'une champignonnière à la Malogne .....	17
Figure 21 : descente par puits dans les carrières de Loos.....	20
Figure 22 : application de la photogrammétrie sur le terrain.....	22
Figure 23 : interface du logiciel Metashape .....	24
Figure 24 : inscription dite « Je pren congiez ... » des carrières de Lezennes (XV ou XVI <sup>ème</sup> siècle).....	25
Figure 25 : application de la RTI sur le site de Phaselis (source : phaselis.org) .....	26
Figure 26 : rendu de la RTI sur une colonne de Phaselis (source : phaselis.org) .....	26
Figure 27 : illustration du dôme (source : HistoricEngland.org.uk) .....	26
Figure 28 : interface du logiciel RTI Builder .....	27
Figure 29 : interface du logiciel RTI Viewer.....	28
Figure 30 : capture d'écran de la reconstruction ratée de la chambre capturée à Lezennes.....	32
Figure 31 : capture d'écran de la texture du fontis capturé à la Malogne .....	32
Figure 32 : capture d'écran de la texture de la catiche à Loos.....	33
Figure 33 : zoom sur la texture de la catiche à Loos.....	33
Figure 34 : vue du dessus d'une galerie 3D capturée sous différents points de l'espace, et les données associées.....	33
Figure 35 : vue du dessus d'un nuage de point de galerie capturée au centre, et les données associées .....	34
Figure 36 : capture d'écran de la texture d'un modèle 3D de la carrière Herriot .....	36
Figure 37 : capture d'écran d'une chambre 3D de la carrière Herriot .....	36
Figure 38 : nuage brut du pilier en diabolo.....	37
Figure 39 : maillage du pilier en diabolo.....	37
Figure 40 : pilier en diabolo reconstitué.....	37
Figure 41 : reconstitution 3D de la champignonnière .....	38
Figure 42 : texture de la champignonnière avec 50 000 faces.....	38
Figure 43 : texture de la champignonnière avec 9 284 177 faces.....	38
Figure 44 : 39 positions de lumière détectée sur une sphère noire .....	39

Figure 45 : fichier PTM avec le mode Luminance Unsharp Masking .....	39
Figure 46 : fichier PTM avec le mode Normals Visualization .....	40
Figure 47 : erreur lors de la création de fichier PTM.....	40
Figure 48 : les différents opérateurs du projet INTERREG RISSC (RISSV, 2020) .....	1



## Liste des abréviations, sigles et acronymes

---

ASBL	Association sans but lucratif
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
FWVL	Interreg France-Wallonie-Vlandereen
GREMS	Groupe de Recherche En Milieu Souterrain
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LGCgE	Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement
PTM	Polynomial Texture Map
RISSC	Risque Sous-Sol engendrés par les terrains sous-Cavés
RTI	Reflectance Transformation Imaging
SPW	Service Public de Wallonie
SCC	Service Commun des Carrières
SDICS	Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines



## Introduction

---

Le développement urbain est un processus sociologique majeur du dernier millénaire et s'est particulièrement accéléré au cours des XIX, XX et XXI<sup>èmes</sup> siècles. Ce développement a énormément modifié les relations de l'humanité avec le milieu naturel.

En effet, la construction a induit depuis le Moyen-Âge et le tournant du XI<sup>ème</sup> siècle, un retour à des matériaux de construction minéraux (roches), généralement à proximité des villes. On a ainsi exploité des calcaires, des granites, des schistes, des sables, des argiles, ..., en fonction de la nature des terrains géologiques proches des villes. Au cours de l'Histoire, l'extraction d'importantes quantités de matériaux a engendré un nombre considérable de vides souterrains liés à l'exploitation dans des carrières (C.R.H.L., 2009).

Avec le développement de l'urbanisation au XX<sup>ème</sup> siècle, ces terrains sous-cavés se sont retrouvés intégrés partiellement ou totalement au périmètre des villes, générant un risque pour les populations et les infrastructures. Quelques situations, heureusement rares, ont ainsi conduit à des drames, comme l'affaissement généralisé de Clamart (Essonne) en 1961 (Figure 1) (B.R.G.M., 2017).



*Figure 1 : photographie de l'affaissement généralisé de Clamart (source : clamart.cyberkate.org)*

Les pouvoirs publics sont en charge de ce risque qui nécessite des mesures d'inspection, voire d'intervention quand le risque est avéré. En effet les cavités se détériorent au cours du temps selon différents facteurs, un désordre en surface comme un affaissement est lié à des dégradations en profondeur. Il en va donc de la sécurité publique de surveiller et de comprendre ces ouvrages et leur évolution au cours du temps. L'article 552 du Code Civil stipule « la propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous ». Toujours dans le Code Civil, il y est également indiqué que le propriétaire est responsable des dégâts causés par ce qui est sous sa garde (INERIS, 2014). Mais la loi oblige actuellement les pouvoirs publics à informer les populations sur les risques liés aux cavités souterraines.

Au-delà du risque qu'elles constituent, les carrières souterraines représentent un héritage commun des sociétés. Elles peuvent répondre à des questions concernant le développement des villes, la sociologie, etc. Elles gardent en mémoire l'évolution des techniques d'extraction, le courage des hommes ayant travaillé en leur cœur au cours des siècles, des lieux de refuge et de cultures maraîchères (champignonnières) (Bivert, 1999 ; C.H.R.L., 2009). Ces vides présentent donc un intérêt pour le patrimoine ; or, leur devenir est d'être comblés et de disparaître, il faut dans la mesure du possible en garder une trace dans la mémoire humaine. Les quelques projets de faire découvrir le patrimoine souterrain au public par le biais de visites se sont heurtés à des estimations d'investissements conséquents pour toutes les mesures de mise en sécurité : à Lezennes, le projet n'a pas abouti ; les carrières Wellington d'Arras ; la Caverne du Dragon à Laon.

Ainsi, pour répondre à cette triple nécessité (surveiller pour protéger, communiquer pour informer, préserver pour se souvenir), l'objectif du stage est d'appliquer des méthodes d'imagerie *in situ*. Le stage, intégré au projet INTERREG RISSC (« Gestion des risques liés à la présence de cavités souterraines en Wallonie et Hauts-de-France »), a pour but de mettre en place une nouvelle technique de suivi des carrières souterraines, en utilisant la photogrammétrie. La technique de relevé photogrammétrique a connu en quelques années des progrès significatifs et de nombreuses applications en archéologie. Il est maintenant possible de calculer des modèles tridimensionnels de manière presque entièrement automatiques à partir d'images numériques (INRAP, 2020).

Du point de vue de l'inspection des carrières souterraines, cette technique représente une alternative intermédiaire entre l'inspection visuelle classique et l'application du laser 3D. L'inspection visuelle ne permet pas de conserver une image des zones fragilisées afin d'en

suivre l'évolution au cours des visites successives. La lasergrammétrie est une technique en général coûteuse, nécessitant une forte expertise et appliquée à des problèmes ponctuels de géométrie et de quantification de volumes à combler, mais ne pouvant être généralisée à l'échelle de toute une carrière.

La photogrammétrie permet de reconstruire en imagerie 3D des volumes importants. Elle est de plus basée sur l'acquisition de photos et non de nuages de points comme la lasergrammétrie, ce qui permet d'en avoir de véritables images. Dans le cadre de ce stage, elle a été appliquée aux carrières de craie de la Métropole lilloise et de Ville de Mons (Belgique). Elle s'intègre aussi bien dans le volet « Compréhension des mécanismes de dégradation des carrières souterraines » que dans les attentes du Master « Archéologie des Géomatériaux, Patrimoine » de l'Université de Reims-Champagne-Ardenne. Ainsi deux techniques numériques, liées à l'archéométrie, seront utilisées : la photogrammétrie, et la Reflectance Transformation Imaging (RTI). La première sera utilisée en tant qu'outils de suivi des carrières, des dégradations présentes dans les carrières, mais également à des fins de conservation patrimoniale et de sensibilisation au risque. La seconde, la RTI, sera mise en place afin de sauvegarder des images des nombreuses inscriptions qui font partie du patrimoine souterrain.

Ce stage a été réalisé dans le cadre du projet RISSC, « Risques Sous-Sol engendrés par les terrains sous-Cavés », inclus dans un programme de coopération territoriale nommé Interreg France-Wallonie-Vlandereen (FWVL). Décomposé en 5 thèmes et financé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER), il vise à favoriser les échanges entre ces régions transfrontalières : l'accroissement de l'effort de recherche/développement et de l'innovation, compétitivité des PME, la protection et la préservation des ressources transfrontalières, en particulier vis-à-vis des risques naturels et technologiques, la valorisation du patrimoine transfrontalier, enfin le soutien à la cohésion territoriale et à la création d'emploi à l'échelle des bassins de vie et d'emploi transfrontalier.

Le projet RISSC, d'une durée de 3 ans (2018-2020) s'inscrit dans le premier et le troisième thème. Ce projet se définit de ce fait comme étant un programme de coopération transfrontalière sur les risques du sous-sol engendrés par les cavités souterraines (voir annexe 1 : les différents modules du projet RISSC). En effet, les régions de la Wallonie et des Hauts-de-France comportent en leurs sous-sols de nombreuses cavités. Les mécanismes de

dégradations et la large répartition de ces cavités impliquent une notion de risque vis-à-vis des biens et des personnes. Le projet vise la mise en commun, l'amélioration de la prévention et la gestion de ces risques. Trois objectifs ont été définis :

- caractériser le risque souterrain : inventorier les cavités et les menaces, les comprendre, évaluer les aléas, création d'une base de données transfrontalière,
- développer des solutions adaptées concernant l'aléa risque : prévention, instrumentation et suivi, mise en sécurité, valorisation,
- apporter un soutien technique auprès des populations et acteurs locaux : réglementation, recommandations locales, sensibilisation, ...

Dix partenaires de Wallonie ou des Hauts-de-France sont impliqués dans la bonne mise en œuvre du projet (voir annexe 2 : liste des opérateurs du projet RISSC) (RISSC, 2020).

Le stage s'est effectué au sein du LGCgE (Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement), qui est un laboratoire de recherche implanté dans différents établissements de la région Hauts-de-France : l'Université d'Artois, l'Institut Mines-Télécom Lille Douai, Yncréa Hauts-de-France et l'Université de Lille avec le département des Sciences de la Terre au sein duquel le stage s'est déroulé. Ce groupe du LGCgE se compose de 5 enseignants-chercheurs permanents, Franck Bourdelle, Michel Dubois, Cyril Durand, Arnaud Gauthier, Emily Lloret. Les équipes de recherche du LGCgE sont divisées en cinq selon les thèmes suivants :

- modélisation et caractérisation multi-échelle des problèmes couplés,
- matériaux innovants,
- matériaux béton et composites,
- fonctionnement des écosystèmes terrestres anthropisés,
- habitat et ville intelligente.

Le laboratoire présente ainsi des activités de recherche depuis le domaine des géomatériaux jusqu'à la gestion de la ville (« Ville intelligente », projet SunRise Smart City du LGCgE) en passant par une compréhension des problèmes liés à l'environnement (sites et sols pollués et techniques de réhabilitation). L'équipe composant le département des Sciences de la Terre de l'Université de Lille travaille sur le thème « fonctionnement des écosystèmes terrestres anthropisés ».

Dans le cadre du projet RISSC, l'équipe du LGCgE apporte ses compétences concernant les outils de caractérisation chimique, physique, minéralogique des matériaux, mais également les équipements permettant de simuler l'altération naturelle sous différents facteurs.

## **Contexte des carrières souterraines**

---

### **A. Petit historique des carrières souterraines péri-urbaines**

Le sous-sol français riche de divers matériaux de construction (calcaires, marbres, gypses, argiles, marnes...) a été exploité notamment dans des carrières souterraines situées à l'origine à l'extérieur des villes. Aujourd'hui abandonnées pour la plupart, elles se retrouvent dans l'espace urbain, preuve de l'expansion de ce dernier (Comentale, 2019).

L'extraction des matériaux en souterrain relève de diverses raisons :

- tout d'abord, technique : à ciel ouvert certaines exploitations auraient nécessité l'évacuation trop importante de matériaux avant d'atteindre celui à extraire.
- ensuite, économique : une exploitation souterraine permet de conserver le sol dans son état, afin de le rendre à l'agriculture dont les rendements étaient faibles à l'époque (Bivert, 1999).

Cependant, dans son article, Guini-Skliar (2003) indique ne pas connaître la date exacte du passage de l'exploitation à ciel ouvert à celle en souterrain, peut-être au XII<sup>ème</sup> siècle. Toujours d'après Bivert (1999), la pierre, entre les IV et XII<sup>èmes</sup> siècles, est réservée essentiellement aux édifices religieux. Les maisons et châteaux sont réalisés en bois. Ainsi, la pierre est synonyme de luxe, mais va finir par s'imposer pour la construction des châteaux forts, villes et enceintes fortifiées. Pour des raisons d'approvisionnement, les carrières se situaient donc à la sortie des villes. Avec la révolution industrielle et l'apparition du chemin de fer, il a été possible de les faire venir de plus loin (Les Maçons Parisiens, 213). Dès lors, l'exploitation des carrières péri-urbaines s'arrêtent.

### **B. Processus de dégradation**

La présence de cavités souterraines (naturelles ou anthropiques) représente un risque pour les populations qui peuvent résider au-dessus. Des accidents peuvent survenir suite à la dégradation de ces cavités. Concernant les cavités anthropiques, les différents types d'exploitation sont résumés dans Moiriat (2001) et Ramadan (2016) :

- par chambres et piliers (Figure 2) : il s'agit de l'exploitation la plus courante et la plus ancienne. Des galeries se recoupent en laissant des masses non exploitées qui forment des piliers et soutiennent la carrière,



Figure 2 : plan des carrières de la Malogne illustrant la méthode d'exploitation par chambres et piliers (Georgieva et al., 2020)

- par galeries (Figure 3) : les matériaux y sont exploités de sorte à tracer les galeries selon une géométrie plus ou moins désordonnée,

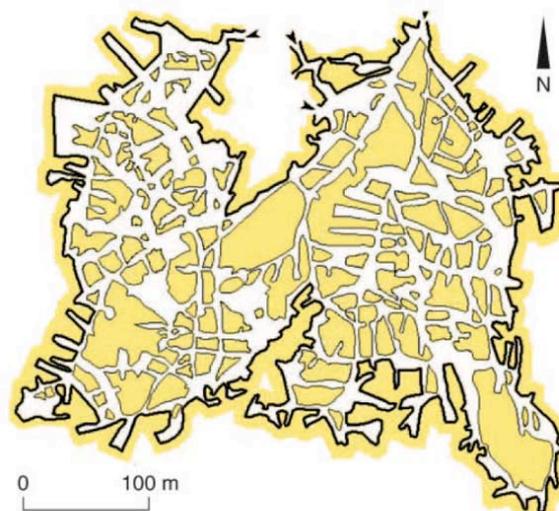


Figure 3 : plan d'une carrière de sable de Fontainebleau exploitée par galeries (source : LCPC)

- par hagues et bourrages (Figure 4) : sur une hauteur réduite, toute la surface de la carrière est exploitée, de nombreux piliers à bras viennent supporter le toit de la carrière, et les vides de la carrière à l'arrière de la taille sont refermés par les déchets d'exploitation (bourrage). Les hagues, murets de pierres sèches retenant les remblais, délimitent aussi les zones remblayées et les galeries d'accès,



*Figure 4 : photographie illustrant l'exploitation par hagues et bourrages (source : rapport LCPC)*

- par puits et chambres de types catiches ou bouteilles (Figure 5) : ces exploitations sont spécifiques à certaines régions. L'excavation peut être isolée (marnières de la Haute-Normandie) ou constituée de puits adjacents disposés en ligne, comme c'est le cas à Lille (catiches). L'accès à ces carrières s'effectue par le toit grâce à un puits de quelques mètres de diamètre, qui va s'élargir en profondeur donnant une forme de bouteille. Une disposition analogue concerne l'exploitation du tuffeau en Anjou (exemple des carrières de tuffeau de Douay-la-Fontaine), la différence dans ce dernier cas est que la chambre est allongée et non circulaire. En fin d'extraction, les catiches sont fermées par une voûte de pierres appelée bouchon, ou par une plaque métallique, une planche ou deux plaques disposées en accent circonflexe (cas des carrières de tuffeau).

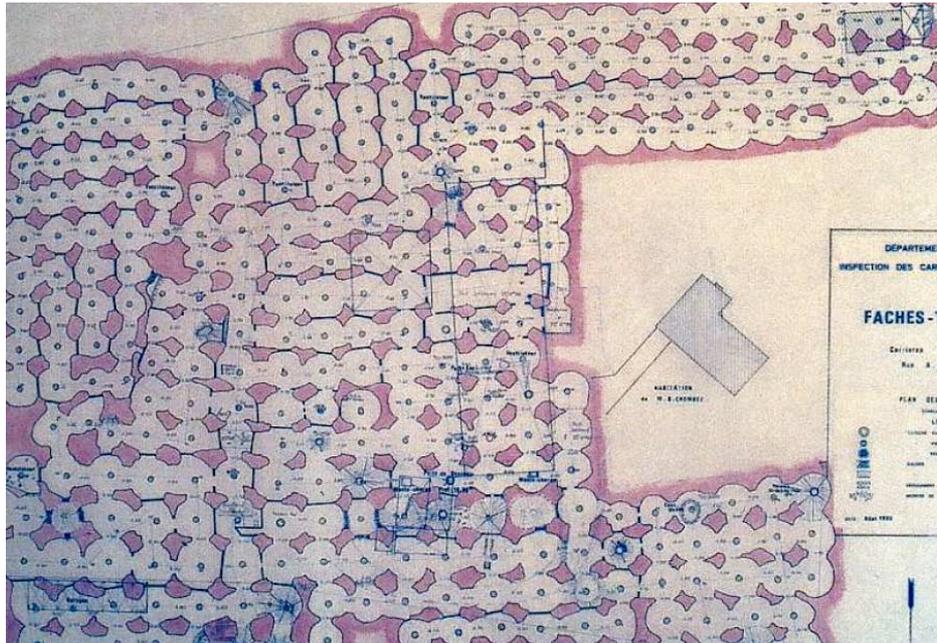


Figure 5 : plan des carrières de Faches-Thumesnil illustrant la méthode d'exploitation par catiches (source : Service Commun des Carrières souterraines)

- par foudroyage ou affaissement dirigé (Figure 6) : méthode bien connue dans la région parisienne pour l'exploitation du gypse, elle consiste à torpiller des piliers résiduels à l'explosif afin de supprimer tous les vides. Les piliers résiduels sont issus d'une stratégie d'extraction : des galeries principales sont réalisées et découpées par plusieurs grands piliers. Chaque pilier est découpé en 4 piliers, dits « piliers résiduels »,

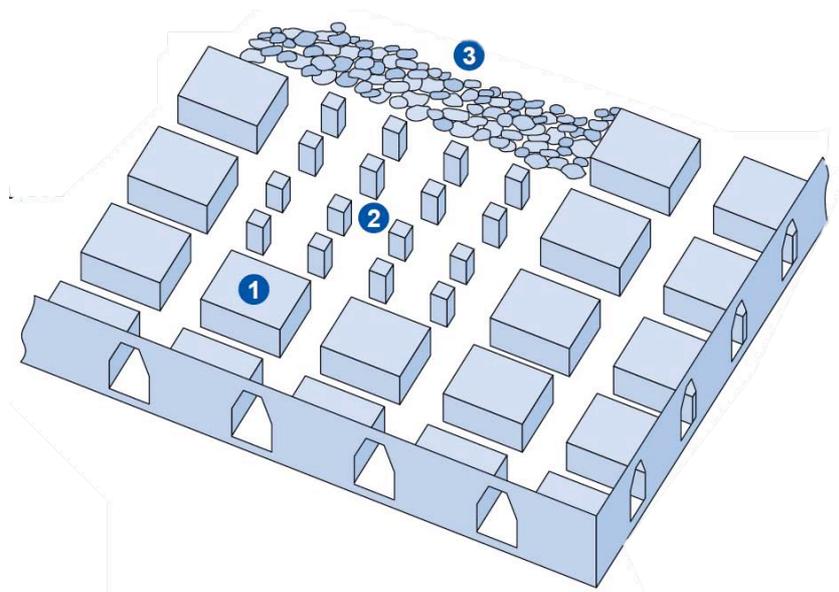


Figure 6 : schéma d'une exploitation par affaissement dirigé (source : LCPC)

Une fois les carrières souterraines créées, elles se dégradent à plus ou moins long terme. Des désordres peuvent se manifester, notamment en surface, mais aussi au niveau de l'accès, et dans la carrière elle-même. En surface, il est possible de retrouver un effondrement localisé ou fontis, un affaissement de terrain, un effondrement généralisé, un éroulement de falaises sous-minées. Nombreux sont les paramètres en relation avec les désordres de surface : la configuration des cavités et leur profondeur, la nature de la couverture des carrières, les modes de ruptures.

- Le fontis (Figure 7) est un effondrement brutal localisé qui forme à la surface un cratère dont le diamètre varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Il démarre à partir d'une rupture de toit de la cavité. Les couches géologiques vont s'ébouler au fur et à mesure jusqu'à la surface, induisant une remontée de la voûte des galeries, puis une cloche. Les conséquences de cet événement sont limitées, mais sa brutalité fait que le risque est élevé.



*Figure 7 : illustration de la formation d'un fontis, d'une chute de toit à sa manifestation en surface (source : <https://geoderis.fr/lapres-mine/thematiques/mouvements-de-terrain/>)*

- Un effondrement généralisé (Figure 8) est un abaissement violent et spontané en surface suite à une rupture de terrain au-dessus de la carrière, résultant de l'effondrement d'une partie des piliers de la carrière voire de la totalité de ces derniers. Un cratère se forme à la surface limité par des fractures sub-verticales. Les conséquences peuvent-être catastrophiques, comme à Coalbrook en Afrique du Sud en 1960 durant lequel 900 piliers se sont effondrés ôtant la vie à 435 mineurs (Simstar, 2020).



*Figure 8 : photographie aérienne d'un effondrement généralisé survenu aux carrières de la Malogne en 2015 (Thys, 2015 ; RISSC, 2020)*

- Un affaissement : il s'agit d'une dépression topographique sous forme d'une cuvette à fond plat et bords fléchis généralement sans fracture, lié à l'influence de la profondeur. Les conséquences de ce phénomène sont peu dangereuses car le phénomène est lent.
- Un écroulement de falaises sous-minées caractérise l'éboulement d'un versant rocheux creusé par des exploitations souterraines, et sont typiques de certaines régions comme la Touraine, l'Ile-de-France ou encore l'Aquitaine. Ils peuvent être dangereux, comme ceux de Rochecorbon qui ont occasionnés la mort de plusieurs dizaines de personnes au fil des siècles (Cherkaoui et Herbaux, 2018)



*Figure 9 : photographie d'une rupture de bouchon de puits (source : LCPC)*

Les désordres affectant les accès aux carrières souterraines varient selon si l'entrée est en cavage ou par puits. Ces derniers sont notamment affectés par des ruptures de bouchons (Figure 9). Ils sont caractérisés en surface par un cratère de quelques mètres et peuvent survenir de façon brutale ou progressive. Une entrée en cavage peut elle

être affectée par des désordres du front rocheux et de l'entrée de la carrière, ou des galeries d'accès. Les premiers se caractérisent donc par un effondrement de blocs rocheux de la dalle de toit, ou des parois extérieures à l'entrée, pouvant mener à terme à l'obstruction de l'accès de la carrière. Les seconds, se caractérisent une dégradation des galeries d'accès par déversement, flambement des parois latérales, ou soulèvement du mur. A nouveau dans cette situation, la carrière risque de ne plus être accessible.

A l'intérieur même des carrières, des désordres peuvent être observés. Ils affectent le toit de la carrière, les piliers abandonnés, ou encore les murs :

- le toit peut être touché par un fléchissement de dalles, puis chutes de toit, ou une remontée de cloche de fontis. Ce phénomène est une des étapes qui peut aboutir à la formation d'un fontis en surface,
- les désordres des piliers abandonnés (Figure 10) vont dépendre de la nature de ces derniers. En cas de bancs homogènes, des fissures mécaniques, des écaillages enfin une dégradation du pilier en forme de diabolos peut survenir. En cas de variations lithologiques les désordres sont liés à l'importance des variations. Si les variations de lithologie sont ponctuelles, les désordres seront observés pour une partie seulement du pilier. Si les variations lithologiques sont importantes, des phénomènes de traction-cisaillement vont occasionner des phénomènes fluage,



*Figure 10 : photographie d'un pilier en diabolos, carrière de la Malogne*

- les murs des carrières peuvent quant à eux être affectés par des ruptures. Cela arrive dans les cas où le mur est constitué d'un banc dont l'épaisseur est insuffisante et une couche sous-jacente déformable. Un poinçonnement se développe par les piliers, accompagné par un cisaillement dans le banc du mur.

Ainsi les carrières souterraines ont été creusées selon différents modes d'exploitation. Divers types de désordres peuvent dès lors apparaître au cours du temps de par la dégradation de la cavité, influencés par certains facteurs de prédisposition (propriétés géomécaniques des roches, structure de la carrière, conditions hydrogéologiques et géomorphologiques), d'exploitation (taux et méthode d'exploitation, surexploitation...), de temps (altération physico-chimique, fluage, fatigue) ou aggravants (activités anthropique et sismique, végétation). L'important étant de comprendre l'intérêt de la surveillance des carrières souterraines abandonnées.

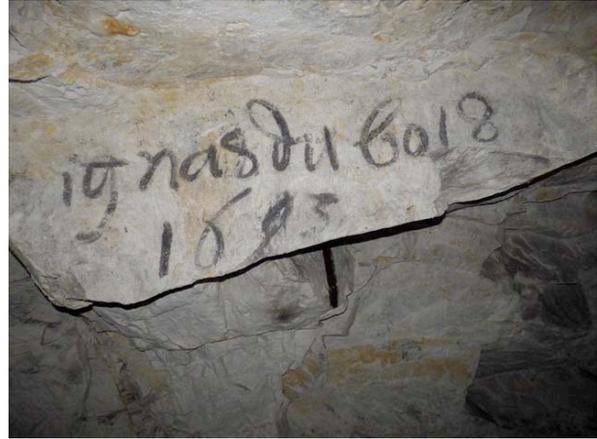
### **C. Intérêt patrimonial**

Le paragraphe précédent a présenté les nombreux risques liés à la présence de carrières souterraines. Celui-ci, plus court, va essayer de plaider en la faveur de la conservation de ces dernières, du moins une partie. Comme mentionné plus haut, les carrières représentent un héritage commun des sociétés, en effet elles ont accompagné le développement des villes, des sociétés, des techniques. Mais au-delà de la stricte activité d'extraction, elles ont été les témoins de nombreux événements de l'Histoire

Les témoins les plus frappants que l'on trouve dans les carrières sont des inscriptions laissées par des exploitants, des personnes réfugiées ou de simples visiteurs. Elles sont parfois très nombreuses lorsque les carrières sont à proximité d'une zone habitée et qu'elles ont servi de refuges. Un recensement rigoureux des inscriptions dans un petit secteur des carrières de Lezennes a été réalisé par Barras (2018). Ce travail montre que les inscriptions anciennes, contemporaines de l'extraction, sont peu nombreuses (Figure 11). Elles deviennent importantes à partir de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Gravées avec un outil pointu et souvent recouvertes de dépôts de carbonate, elles sont souvent assez peu lisibles. Elles peuvent être aussi écrites en noir, sans doute avec une matière charbonneuse, comme celles qui ont été observées dans les carrières de Loos au cours de ce stage (Figure 12).

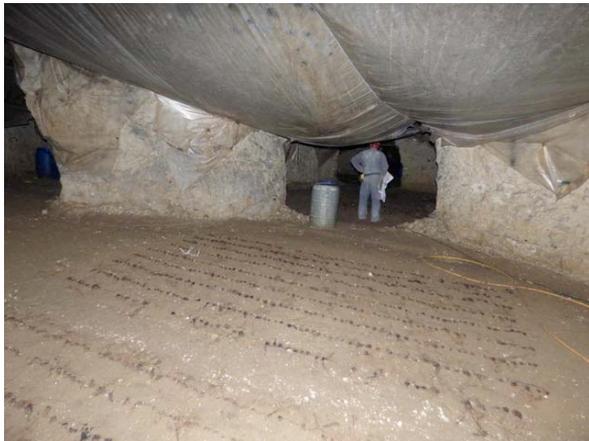


*Figure 11 : inscription « JoS / 1754 », carrières de Lezennes*



*Figure 12 : inscription « Igna[ce] Du Bois / 1693 », carrière de Loos*

De la période d'exploitation, à part ces témoignages écrit sporadiques, il reste peu de choses, l'exploitation ne donnant lieu qu'à de très rares aménagements : petites cavités creusées dans la paroi pour poser la lampe à huile. Il y avait peu d'étayage, ni d'aménagements pour les animaux de trait, sauf dans les carrières plus récentes comme La Malogne. Les seules traces sont des traces d'outils qui pourraient faire l'objet d'une description afin de retrouver les outils utilisés en fonction des époques (Bessac, 2010).



*Figure 13 : chambre où l'on pratique la culture de la barbe de capucin (Carrière de Loos)*

Après la phase d'exploitation, les carrières souterraines sont parfois devenues le site d'exploitation maraîchère de champignons. C'est le cas des carrières de Lezennes (C.R.H.L., 2009) et de la carrière de la Malogne (Stevens, 2005). On trouve aussi des « champs » de barbe de capucin (Figure 14), variété de chicorée sauvage, une des plantes herbacées vivaces de la famille des Astéracées ; il s'agit de salles dont le sol a été creusé de sillons où l'on replantait les racines en sous-sol pour récolter les feuilles blanchies comestibles. Dans la métropole, il n'existe plus qu'une seule exploitation, à Loos. L'absence de lumière, la température et l'humidité sont des conditions favorables à ce type de maraîchage.

Outre ces activités classiques, les carrières ont aussi servi de refuges aux époques mouvementées de l'histoire de la région. Ainsi, on retrouve des secteurs qui ont été habités lors des deux dernières guerres mondiales ; elles présentent en général de très nombreuses inscriptions de « résidents », et un fléchage vers les sorties qui étaient en général les caves de maisons particulières. Ces salles présentent en général encore des témoignages de ces séjours plus ou moins longs : sommiers métalliques, vaisselles en céramique ou en métal, semelles de chaussures, étayages en métal pour soutenir les dalles du toit des galeries. Certaines salles ont été aménagées en salles de jeux, chapelles (« Autel des scouts » à Lezennes, C.R.H.L., 2009), lieux de rassemblements... à des époques qu'il est parfois difficile de préciser.

## Contexte des carrières ciblées

---

Dans le cadre du projet RISSC qui a pour objectif de comparer les pratiques en matière de gestion et de surveillance développées dans les Hauts-de-France et en Belgique, deux carrières, dites « miroirs », ont été sélectionnées. Elles présentent des points communs, notamment des zones inondées, des piliers fragilisés et bénéficient d'une surveillance monitorée. Du côté français, la carrière Herriot fait partie des nombreuses carrières de la métropole lilloise ; du côté belge, la carrière ciblée est la Malogne située principalement sous la commune de Cuesmes, près de Mons.

Les carrières de Lille seront présentées dans leur globalité, puisque les visites de terrain dans le cadre de ce stage ont concerné plusieurs carrières.

### A. Carrières de la métropole lilloise

#### 1. Géographie et géologie régionales

La région lilloise se situe au nord de la France, dans le département du Nord. Elle s'intègre dans un ensemble géologique qu'est le Bassin Parisien. Cet ensemble se compose essentiellement de craie, et celle de Lille est la craie blanche du Sénonien. Elle résulte d'un épisode de transgression continental commencé il y a 90 millions d'années (SIGES Seine-Normandie, s. d.). Son affleurement est à mettre en relation avec les mouvements du Massif Ardennais : ils ont permis la formation de plusieurs anticlinaux, dont celui du Mélantois, sur lequel la métropole lilloise est en partie localisée (Ramadan, 2016). L'anticlinal du Mélantois et les phénomènes d'érosion permettent à la craie d'affleurer. Celle qui constitue la formation exploitée est la craie blanche du Sénonien qui repose sur la craie grise du Turonien par l'intermédiaire d'un hardground, appelé localement tun et riche en granules phosphatés (Dubois, 2009). Outre la craie, d'après la carte géologique au 1/50 000<sup>ème</sup>, le sol est composé également d'une couverture de sables et des argiles du Tertiaire recouverts par des limons de plateau (Figure 14).



*Figure 14 : panorama montrant la stratigraphie de la région de Lille. Sur la craie blanche reposent les sables verdâtres du Landénien puis les limons quaternaires (chantier situé à Villeneuve d'Ascq, à proximité du Stade Pierre Mauroy) (Photo 20/08/20)*

## 2. Historique et patrimoine

Le sous-sol de la métropole lilloise comporte de nombreuses carrières de craie. La pierre extraite de ces carrières était destinée à la construction. Les prémices de l'exploitation auraient pu débiter à l'époque gauloise, mais pour le marnage des champs et non à des fins de construction. Juste après vient la période gallo-romaine avec les premières vraies traces d'exploitation. En effet quelques vestiges ont été retrouvés (murs, fondations...), mais il manque des informations concernant les moyens utilisés pour extraire la pierre, ainsi que la localisation. S'ensuit le Moyen-âge, durant lequel l'utilisation du bois a globalement été adoptée au détriment de la craie, même si, faute de preuves, on ne peut assurer un arrêt total de l'extraction. Entre le XI et le XV<sup>èmes</sup> siècle, on assiste au développement des carrières avec la présence encore aujourd'hui de vestiges d'anciennes constructions : les premiers remparts de Lille (aux environs de 1230), le Palais Rihour (milieu du XV<sup>ème</sup> siècle). Les carrières ont connu leur essor au XVII<sup>ème</sup> siècle avec la construction de la citadelle de Lille par Vauban, sous le règne de Louis XIV ; Lille étant devenue la frontière entre les Pays-Bas et la France. Cet essor demeura jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, période à laquelle l'exploitation s'acheva. Plusieurs causes sont à l'origine, notamment la révolution industrielle qui a entraîné

une utilisation de matériaux nouveaux (briques industrielles), et l'ouverture d'autres sites d'exploitation. Au total, 1 400 000 m<sup>3</sup> de matériaux ont été extraits des carrières.

La culture de champignons et la barbe de capucin prirent le relais dans les souterrains, l'absence de lumière, la température et l'humidité étant des conditions favorables. Ces deux types de culture se sont arrêtés vers 1957, à Lezennes uniquement, car elles perdurent encore dans certains secteurs de la région lilloise, notamment sous la commune de Loos. Ponctuellement, les carrières ont eu une toute autre fonction : celle d'abris. Elles ont donné refuge bon nombre de personnes tout au long de l'histoire, et plus particulièrement encore lors des Guerres mondiales, durant lesquelles des accès ont été aménagés à partir des caves.

Ainsi, de par son riche passé, les carrières de Lezennes ont vu bon nombre de visiteurs (carriers, lezennois, « touristes » ...), ce qui explique son patrimoine historique en matière d'inscription (C.R.H.L., 2009).

### 3. La carrière Herriot

La carrière dite « Herriot » est une carrière appartenant au sous-sol de la métropole lilloise, et fait l'objet d'une inspection régulière de la part du Service des risques urbains de la ville de Lille. Elle a aussi été équipée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) par des instruments de surveillance (cannes de convergence, sonomètre, piézomètre) afin de suivre l'évolution dans certains secteurs sensibles. Elle se situe entre l'axe Pavé du Moulin et le Boulevard de l'Ouest sur le territoire de la commune Lille-Hellemmes (Figure 15). Ce secteur comprend des habitations individuelles, des bâtiments publics, des espaces verts et agricoles, de la voirie.



*Figure 15 : localisation de la carrière Herriot (carte créée à partir des données OpenStreetMap)*

Au final la carrière s'étend sur 275 m du nord au sud et environ 200 m d'est en ouest, elle est située entre 8 et 14 m de profondeur. La méthode d'exploitation est mixte, c'est-à-dire en chambres et piliers et en puits, dont on en dénombre 150. 4 ont été aménagés par le SDICS afin de procéder aux inspections. On retrouve dans cette carrière 3 types de discontinuités : des diaclases à pendage vertical, des couloirs de diaclases, des failles avec un pendage d'environ 70°. En termes de désordres, il a été relevé notamment des détachements de dalles du plafond, des fontis et de la desquamation de piliers (Dubois, communication personnelle).

## B. Carrière de la Malogne

### 1. Géographie et géologie régionales

Les carrières de la Malogne se situent dans la région de Mons en Belgique (Figure 15), plus précisément sous les communes de Cuesmes et Hyon. Les carrières s'intègrent en bordure sud du Bassin de Mons, vaste ensemble géologique à allure synclinale, occupé par des formations du Mésozoïque et du Cénozoïque, reposant directement sur le socle houiller (d'âge Paléozoïque) (Figure 17). Les formations méso-cénozoïques présentent de nombreux faciès de craie, de sables et d'argiles (Figure 17).

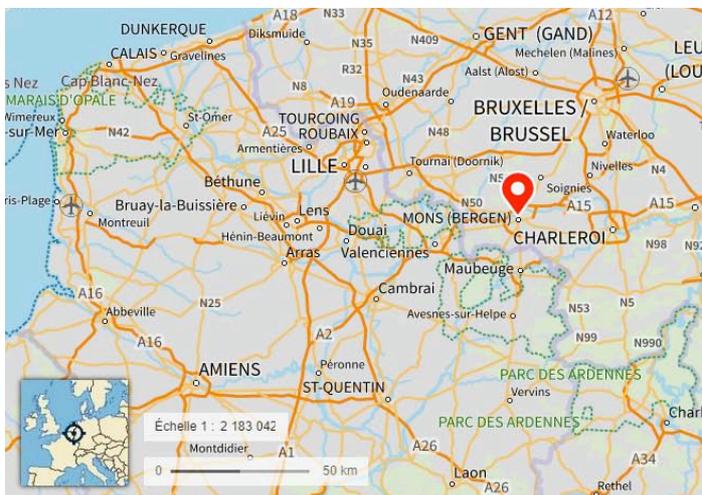


Figure 16 : situation de la ville de Mons (source : Géoportail)

Cependant la craie des carrières de la Malogne, dite la craie phosphatée de Ciplu-Malogne déposée à la fin du Crétacé, semblerait plutôt être une calcarénite phosphatée (c'est-à-dire constituée à 55% de débris de microfossiles et cristaux de calcite, et à 25% de coccolithes) (Mortier, 2013). La teneur en phosphate est comprise entre 8 et 12% (Robaszynski *et al.*, 1988).

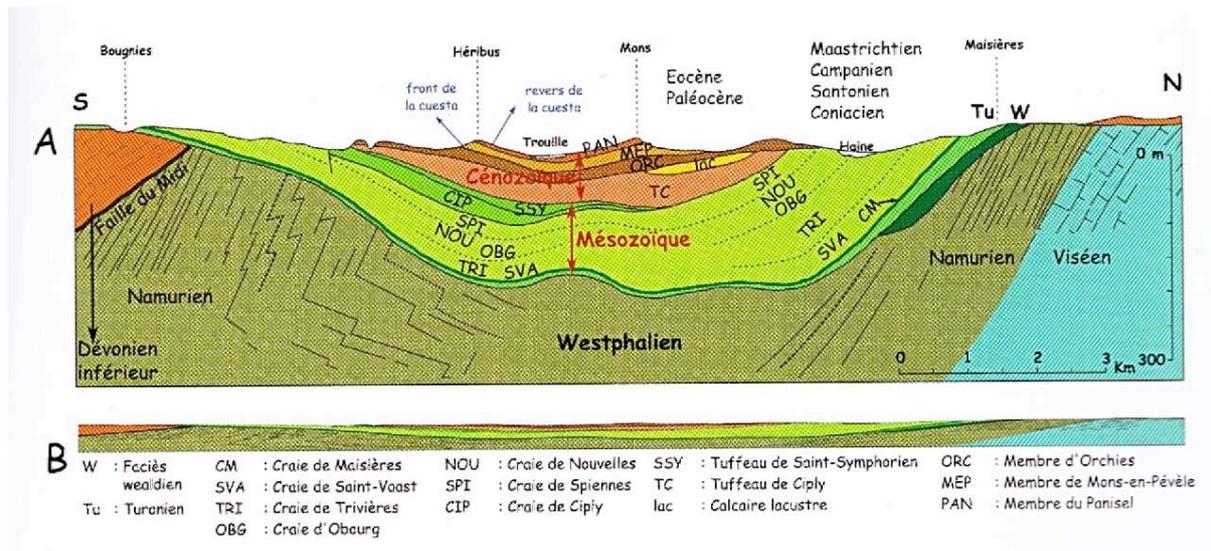


Figure 17 : coupe du Bassin de Mons. A : Echelle des hauteurs exagérée 10 fois, d'après R. Marlière, 1978. B : Hauteurs sans exagération modifié (source : le Grand Mons, Itinéraires pédagogiques du Géoparc du Bassin de Mons)

Les carrières présentent également une particularité au niveau hydrogéologique, celle d'observer la nappe d'eau souterraine, visible sur la Figure 18.



Figure 18 : photographie de la nappe d'eau souterraine présente à la Malogne

L'exploitation de cette craie a mis au jour 52 squelettes plus ou moins complets de mosasaures, et a permis la découverte d'*Hainausorus bernardi* en 1885 (Leclercq, 1991) (Figure 19).



Figure 19 : Hainausorus bernardi, exposé au Muséum des Sciences Naturelles de Bruxelles (source : valleedelahaine.be)

## 2. Historique

La Malogne est un témoin de l'industrie du phosphate qui a marqué la vie cuesmoise à partir de 1874. Dès 1858, l'existence de phosphate était soupçonnée, et en 1873, Briart et Cornet publièrent leur découverte concernant des grains phosphatés dans la craie de Cibly. En 1874, Maduron et Rolland créèrent une usine à Cibly, mais se séparèrent rapidement, après 2 ans d'association : Laduron poursuivit à Cibly, et Rolland s'installa à Cuesmes. Dès lors, autour de Mons, on assistera à l'exploitation industrielle de la craie phosphatée. Son extraction prendra fin après la Seconde Guerre mondiale (malgré quelques reprises jusque 1958) suite à la concurrence des phosphates provenant d'autres pays (Russie, Afrique du Nord...) (Mortier, 2013).

Cette activité terminée, les carrières souterraines de la Malogne s'étendent sur 3 100 m pour une largeur de 470 m et présentent une surface de 67 ha dont entre 30 et 40 sont accessibles aujourd'hui. Pour donner d'autres chiffres afin de se représenter la taille de cette carrière, entre 150 et 175 km de galeries ont été creusés, et la hauteur des chambres varie entre 2 et 8 mètres (Thys, 2015).

Malgré l'arrêt de l'extraction du phosphate, l'histoire de la Malogne a pu continuer jusqu'en 1962 (Leblois *et al.*, 2020) grâce à la culture de champignons (Figure 20) débutée en 1935 et ce grâce au fumier de cheval produit par les casernes montoises. Ce dernier était composté,ensemencé de mycélium et recouvert d'une fine poussière de craie. Le fumier et les conditions de la Malogne (température constante, humidité élevée) étaient ainsi idéaux pour la culture de champignons (Mortier, 2013).



*Figure 20 : photographie d'une champignonnière à la Malogne*

Les carrières souterraines de la Malogne sont inscrites au patrimoine immobilier exceptionnel de Wallonie depuis 1990, et une partie du site est classé Natura 2000 depuis 1987 afin de protéger les chiroptères présents (Leblois *et al.*, 2020).

L'origine du nom Malogne diverge selon les sources. Il pourrait dériver du latin Mathlunmjo (Landes à Mallun), ou de « terres marneuses des plateaux » (Mortier, 2013). selon Buslin et Mahieu (1985), le nom proviendrait, selon de vieux carriers, du nom des déchets de craie.

Plus récemment, le 2 avril 2015, le site de la Malogne a subi un effondrement généralisé à proximité de la voie de chemin de fer, causé par des piliers abîmés baignant dans la nappe d'eau souterraine. Ainsi 130 piliers auraient été écrasés. L'effondrement a généré une cuvette de 155 mètres sur 75 mètres de largeur, sa profondeur variant entre quelques décimètres à 3 mètres (Figure 8).



## Matériel et méthodes

---

### A. L'inspection

#### 1. Présentation des partenaires

##### a. Mairie de Lille

Les descentes dans les carrières de la métropole lilloise ont été rendues possible par l'accompagnement du Service Commun des Carrières souterraines (SCC), rattaché au Service des Risques Urbains de la Mairie de Lille. Il s'agit d'un service qui permet de prévenir et gérer le risque d'effondrement lié aux carrières souterraines qui représentent une surface de 181 hectares (soit un volume de vide estimé à 4,5 millions de m<sup>3</sup>) sur le territoire de 12 communes de la métropole lilloise. Le service est composé de Gaëtan Cheppe (responsable du service), Jésahel Benoist, Jean-Marie Boussin, Guillaume Faucheux, Christophe Wyffels, une partie de l'équipe provenant de l'ancien Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines (SDICS, créé en 1967), puis Service d'Expertise et d'Ingénierie des Sols et Matériaux (SEISM), dont les missions sur les carrières se sont arrêtées en 2018.

##### b. Association Sans But Lucratif Projet Malogne

Les visites dans les carrières de la Malogne ont pu être réalisées grâce à l'accueil des bénévoles de l'association ASBL Projet Malogne : Eric Leblois, Philippe Manceaux et Nicolas Manceaux. Cette association a pour buts notamment d'étudier, protéger et mettre en valeur le site des carrières souterraines de la Malogne à Cuesmes (commune de Mons, Hainaut) à travers diverses actions :

- la découverte et le partage de la connaissance du site avec le grand public (visites, publications et tout autre moyen de diffusion),
- l'accompagnement de missions de recherches scientifiques,
- la maîtrise foncière des secteurs privés,
- la matérialisation et le contrôle des accès,
- l'établissement de ponts collaboratifs avec toute structure pouvant l'aider à accomplir ses objectifs.

## 2. Conditions de descente

L'accès au milieu souterrain n'est jamais trivial. En effet, les risques sont potentiellement nombreux. Ils incluent :



*Figure 21 : descente par puits dans les carrières de Loos*

- le risque d'une chute dans la voir d'accès, en général un ancien puits d'extraction chemisé équipé d'une échelle métallique (Figure 21) ; c'est le cas de la plupart des accès de la région lilloise. En revanche, l'un des accès de Lezennes est un escalier à partir d'une cave et l'accès à la Malogne est une descenderie qui débute sur l'ancien carreau de la carrière,
- le risque de se perdre dans un véritable dédale de galeries,
- le risque de recevoir un bloc tombant du plafond,
- le risque de rencontrer une atmosphère malsaine (taux d'O<sub>2</sub> trop bas, présence de CH<sub>4</sub> ou H<sub>2</sub>S),
- des risques ponctuels, tels que tomber dans un puits à eau, chutes, glissades...

Il est donc nécessaire de prévoir tous les équipements de sécurité. L'équipement individuel comprend donc un casque de type spéléo avec frontale, des chaussures de sécurité et des gants. Un équipement de spéléologie, incluant un baudrier avec descendeur, accompagne la descente, dans le puits. Lors d'une descente, au moins une personne possède un analyseur de gaz, un dosimètre pour la radioactivité et une copie des plans.

Lors de la marche sous terre, personne ne doit s'éloigner seule du groupe et au cas où l'un des membres se perd, il reste immobile à l'endroit où il est perdu. Chaque descente est précédée par un appel téléphonique au secrétariat du service pour signaler l'heure de descente et l'heure programmée de remontée. En cas de problème, le Groupe de Recherche En Milieu Souterrain (GREMS) est contacté par le secrétariat.

## B. Photogrammétrie

### 1. Intérêt et caractéristiques de la méthode

Au début du stage, lors de la recherche bibliographique, il était évident de faire des recherches sur la photogrammétrie, que ce soit sur les principes de la photogrammétrie ou les techniques (sur sa mise en place et équipement). Dans de nombreux résultats est apparu une dualité entre photogrammétrie et scanner 3D. Le scanner 3D semblait le plus utilisé et le plus recommandé, d'autant plus que ce dernier peut être couplé à de la photogrammétrie. Mais en y regardant de plus près, il s'agissait d'anciens articles. En effet, la photogrammétrie a commencé à gagner en crédibilité il y a une dizaine d'années maintenant, de par son coût (uniquement un appareil photo et un logiciel sont nécessaires), par la rapidité, et enfin les nombreuses applications (en architecture, en archéologie, à partir d'une petite pièce de monnaie jusqu'à une grotte complète, en passant par la façade d'un bâtiment).

De ce fait, la question de l'application de la photogrammétrie dans le suivi des désordres de carrières souterraines est tout à fait légitime. Le scanner 3D étant un très bon outil, mais coûteux à mettre en place (appareil laser, achat d'une station de grosse capacité de traitement, formation d'un technicien), son utilisation n'est pas systématique.

Le principe de base de la photogrammétrie est de reconstituer en 3 dimensions, un sujet pris en photo. Un logiciel est nécessaire pour la reconstruction, il va analyser les photos afin de trouver des points communs sur chacun des clichés, et les replacer dans l'espace. Plusieurs étapes peuvent être détaillées :

- alignement des photos et génération d'un nuage de points dense : durant cette étape, les positions de l'appareil photo et l'orientation des clichés sont restituées, ensuite il est possible pour le logiciel de retrouver tous les points qui sont présents sur deux photos. La finalité est un nuage d'une multitude de points (Agisoft, 2019 ; Lanzi, 2009),
- maillage : création de faces (triangles) dont les points du nuage de points en sont les sommets. Il s'agit en réalité d'un changement d'interprétation algorithmique, un nuage de points conserve le vide entre les sommets, un mesh (issu du maillage) génère des surfaces sur lesquelles il sera possible d'ajouter les textures (Valente, 2018),
- ajout des textures : s'effectue à partir des vraies images.

## 2. Conditions de prise de vues en milieu souterrain

Le travail consiste d'abord à prendre des photos dans les carrières. Une réflexion quant au mode de prise de vues est nécessaire. Tout d'abord, le flash est évidemment proscrit, la lumière doit être homogène sur toutes les photos et celles-ci doivent être éclairées de la même façon tout au long de la prise de vue. De ce fait, la meilleure façon d'obtenir une lumière homogène est d'utiliser des projecteurs. Le choix s'est porté sur des projecteurs portables à LED Brennentstühl de 2 000 lumens. L'achat de projecteurs portable et le nombre ont aussi été réfléchis : il fallait penser à l'encombrement dans les carrières, c'est-à-dire le nombre de projecteurs qu'il est possible de transporter, le moyen d'accès des carrières, mais aussi au prix. Cet achat effectué, il faut alors se renseigner sur la façon dont on règle un appareil photo. Le mode automatique ne permet pas de garder les mêmes paramètres d'une photo à l'autre, et utilise un peu trop facilement les ISO ce qui détériore la qualité de la photo. Il est apparu qu'il valait donc mieux utiliser le mode A (aperture), réglé sur 3, qui permet de choisir l'ouverture soit la quantité de lumière qui entre dans l'objectif. L'appareil photo disponible au laboratoire est un bridge, il s'agit du Lumix FZ45, qui a pour caractéristiques principales :

- un capteur CCD de 14 Mpx, 1/2,3", 49 Mpx/cm
- un objectif 25-600 mm, zoom 24×, f/2,8 -5,2

L'appareil photo est monté sur un trépied pour éviter un flou de mouvement sur les photos (Figure 22).



*Figure 22 : application de la photogrammétrie sur le terrain*

De nombreux conseils sur la prise de vue en photogrammétrie sont donnés, cependant tous ne sont pas applicables dans un environnement tel que celui des carrières souterraines. Ainsi, les photos dans les carrières ont été obtenues non pas en balayant la zone étudiée (1 photo = 1 position), mais en étant posté à différents points de l'espace, et en balayant tout ce qui était possible de prendre à partir de ce point. Le sol des carrières étant accidenté, il était impossible de changer de position à chaque photo. De plus, la meilleure résolution possible par l'appareil photo (14 Mpx) imposait un format 4:3, ce qui a augmenté le nombre de photos à prendre. Lors de la prise de vue, il faut s'assurer en revanche que toutes les photos se superposent un minimum, afin que logiciel puisse trouver les points communs et la position de la prise de vue, afin de générer le nuage de points. Il ne faut pas hésiter à prendre les photos en doublon, le simple déclenchement de l'appareil photo pouvant créer un flou. Les photos sont ensuite triées sur ordinateur, et sont rentrées dans le logiciel.

### 3. Traitement des photos pour la reconstruction du modèle

Un bon nombre de logiciels existe sur le marché afin reconstruire un modèle 3D. 3DF Zephyr, Autodesk Recap, Agisoft Metashape, Regard 3D, Visual SFM, Micmac, Bundler, PMVS, CMVS, Meshlab, Meshroom, PhotoModeler scanner, Pix4D. Certains sont open-source, d'autres payants, d'autres spécialisés dans la photogrammétrie par drone, mais après des recherches un premier choix s'est porté sur 3DF Zephyr, Autodesk Recap, Metashape, Meshlab + Visual SFM, Meshroom. Il fallait un logiciel accessible de par le prix, de par la prise en main (MicMac), permettant de faire des mesures, et donnant de bons résultats.

- 3DF Zephyr avait déjà été testé durant le stage de licence 3 et donnait d'excellents résultats, la version Pro permet de réaliser des mesures, mais le prix de la licence, même éducative reste élevé (1 200 €).
- Meshlab et Visual SFM avaient l'air de donner des résultats moins satisfaisants (il faut combiner les deux pour obtenir un modèle photogrammétrique). La prise en main semblait assez compliquée, et aucune information sur la possibilité de mesurer n'était disponible, mais ils présentent l'avantage d'être open-source.
- Metashape donnait déjà de bons résultats en licence, des mesures peuvent être réalisées et l'interface utilisateur est simple. De plus, la licence éducative demeure accessible (549 \$).
- Autodesk ReCap ne permet pas d'avoir la main sur le modèle, c'est le *cloud* qui génère le modèle 3D. Ce logiciel semblait être une alternative très simple, d'autant

plus que les mesures sont possibles, et qu'il est en accès libre pour les étudiants. Cependant des tests infructueux ont été réalisés dès le début du stage, et le modèle est limité à 100 photos.

- Meshroom par AliceVision est un autre logiciel de photogrammétrie sorti récemment (2019). Open-source, il paraît très complet et accessible mais la configuration requise (GPU), ne permet pas à n'importe quel ordinateur de l'utiliser.

Après la vérification de caractéristiques, quelques tests avec des versions d'essai, le choix final s'est porté sur Metashape (Figure 23). En ce qui concerne l'ordinateur utilisé, il fonctionne sous Windows 10, est équipé d'un processeur Intel Core i7-9700K cadencé à 3,6 Ghz avec 32 Go de RAM. L'ensemble du traitement vidéo est assuré par une carte graphique GeForce RTX2070 avec 8 Go de mémoire.

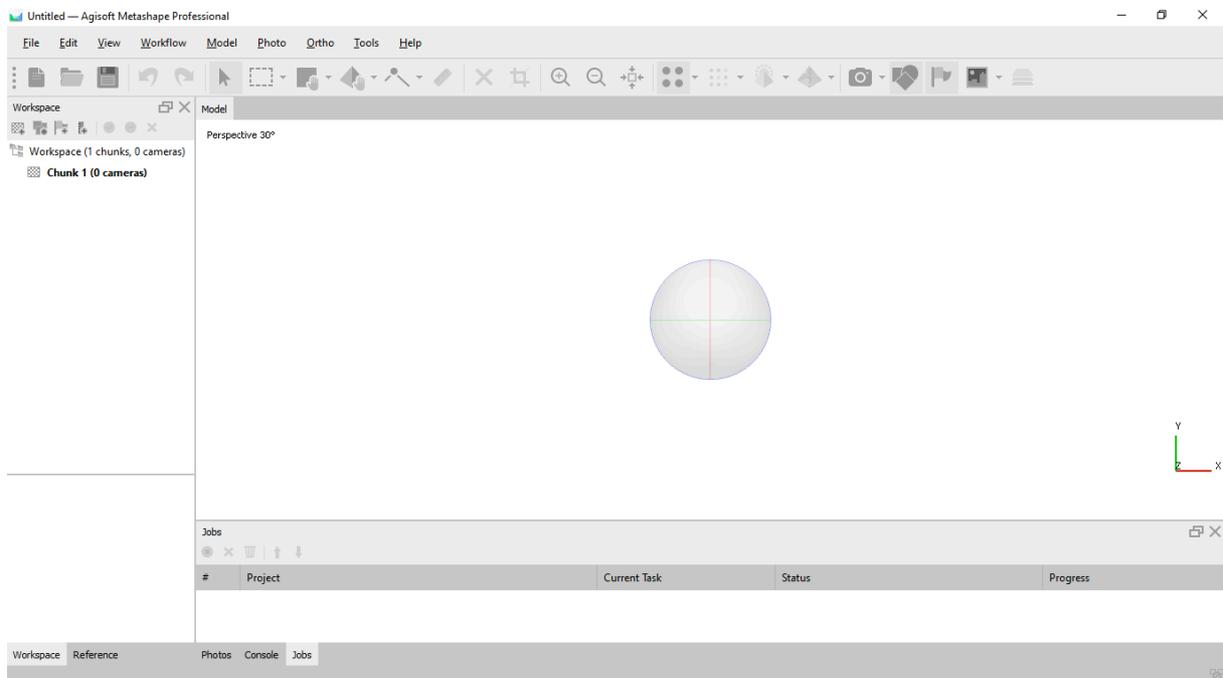
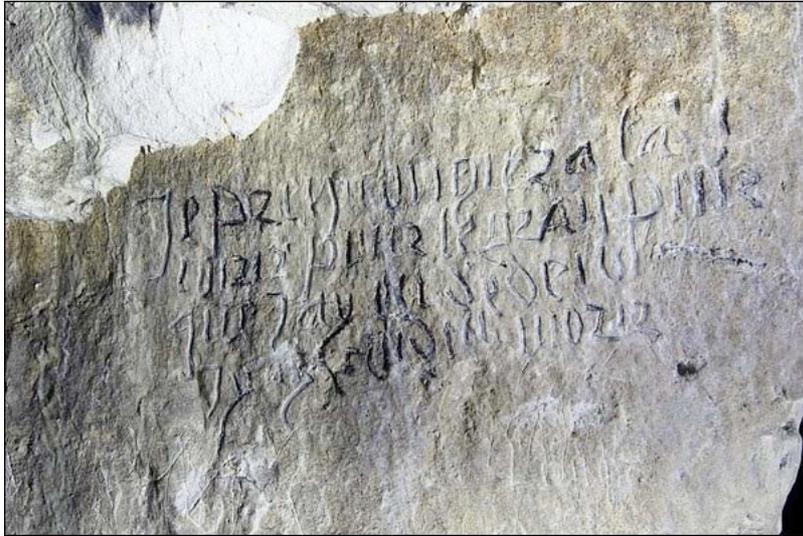


Figure 23 : interface du logiciel Metashape

### C. Reflectance Transformation Imaging

Au cours d'un premier stage (« Patrimoine historique d'un secteur de carrières souterraines de la commune de Lezennes (Métropole de Lille) » (Barras, 2018)) portant sur les carrières souterraines, la question du relevé d'inscriptions s'était posée. En effet les carrières souterraines en général, mais particulièrement celles de Loos ou Lezennes se révèlent être riches en inscriptions des visiteurs de passé.

Certaines peuvent se révéler exceptionnelles telle que « Je pren congiez a la corir pour le grand peur que j'ay eu deden j'y ay cru d'en morir » à traduire par « Je prends congé de la carrière pour la grande peur que j'ai eue dedans, j'ai cru en mourir », qui daterait du XV<sup>ème</sup> ou XVI<sup>ème</sup> siècle (C.R.H.L., 2009) (Figure 24). D'autres, de par les conditions régnant dans les carrières souterraines de craie, sont très peu lisibles, malgré un potentiel qui se laisse deviner.



*Figure 24 : inscription dite « Je pren congiez ... » des carrières de Lezennes (XV ou XVI<sup>ème</sup> siècle)*

Pour sauvegarder ces traces du passé, il est donc tout à fait possible de s'armer de son appareil photo à chaque inscription, tout en relevant la position de celle-ci sur un plan. Jouer avec la lumière rasante permet très souvent de prendre de beaux clichés et d'immortaliser le témoignage d'un visiteur de longue date. Mais parfois la lumière rasante ne suffit pas, l'humidité sur les parois des carrières de craie rend la lecture impossible, c'est là que la Reflectance Transformation Imaging peut intervenir.

La RTI est développée par la société à but non lucratif Cultural Heritage Imaging. Il s'agit d'une technique d'imagerie basée sur la compilation de photographies, dont seule l'orientation de la lumière varie, créant une série de clichés d'un même objet avec des reflets et ombres différents (Bouhier et Méaudre, 2019). Le logiciel RTI Builder va composer une image virtuelle, et RTI Viewer va permettre la visualisation, en simulant de la lumière dans n'importe quelle direction, ou en modélisant une image uniformément éclairée (Mytum et Peterson, 2018). Il est ainsi possible de découvrir des détails invisibles à l'œil nu, et de mettre au jour des inscriptions qui semblaient illisibles. Les champs d'application en archéologie sont nombreux, et peuvent varier de la numismatique au lapidaire, comme ça a été le cas sur un projet de recherche en épigraphie sur le site de Phaselis en Turquie (Akçay, 2015) (Figure 25 et Figure 26).



Figure 25 : application de la RTI sur le site de Phaselis (source : phaselis.org)



Figure 26 : rendu de la RTI sur une colonne de Phaselis (source : phaselis.org)

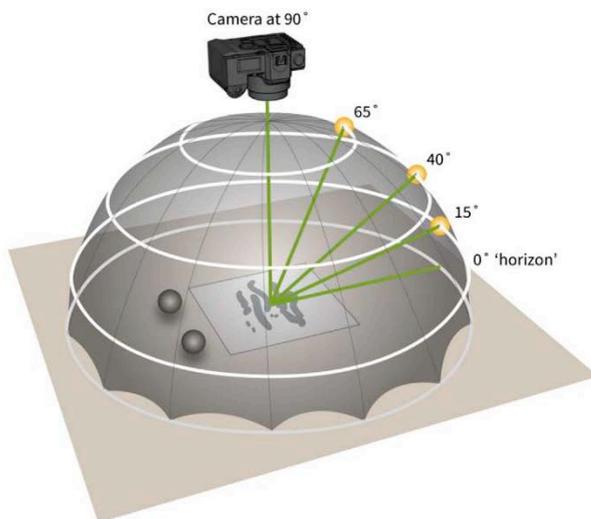


Figure 27 : illustration du dôme (source : HistoricEngland.org.uk)

CHI met à disposition un guide afin de pouvoir appliquer la méthode RTI. Il faut tout d'abord démarrer par l'acquisition du matériel : un appareil photo, un trépied, une source lumineuse, et des sphères noires brillantes. L'appareil photo, configuré au format RAW, reste fixe durant le temps de la prise de vue, ce sera le même que celui utilisé en photogrammétrie. La source lumineuse va être mobile, couvrir des angles entre 15 et 65°, et ainsi changer de position entre chaque cliché, le tout décrit un dôme (Figure 27).

Même chose que pour l'appareil photo, ce sera un des projecteurs utilisé pour la photogrammétrie qui servira de source lumineuse. D'autant plus que de plus petites lampes comme les lampes frontales disponibles sur le terrain, ne diffusent pas une lumière uniforme. Les sphères noires brillantes (ou rouge) reflètent la lumière incidente, et vont permettre au logiciel de retrouver la position de la lumière sur les photos. Elles doivent être deux minima,

et représenter 250 pixels sur la photographie. Il a été possible de se procurer des sphères de 3 tailles différentes : 40, 32, et 28 millimètres. Le moyen de fixation de ces sphères dans le cadre de vue est problématique dans les carrières souterraines. D'après le guide de CHI, des trépieds peuvent être utilisés pour maintenir les sphères lors de la prise des photos, il est également possible d'utiliser du scotch. Mais le fait est qu'en carrières souterraines, il est compliqué (comme avec la photogrammétrie), de descendre avec plusieurs trépieds, comme il est compliqué de faire tenir les sphères plutôt lourdes, sur un mur humide avec du scotch. La solution retenue, sans être idéale, a été de la gomme tackante, dont la quantité à utiliser selon le poids de la sphère peut être modulée. Il est recommandé de faire au minimum 48 photographies.

Deux descentes ont été effectuées avec le but de tester la RTI sur des inscriptions très peu lisibles. Les séries de photos valables ont été traitées dans le logiciel RTI Builder (Figure 28), en utilisant la séquence d'opération qui se nomme Highlight Based avec le plugin Polynomial Texture Map Fitter (PTM Fitter).

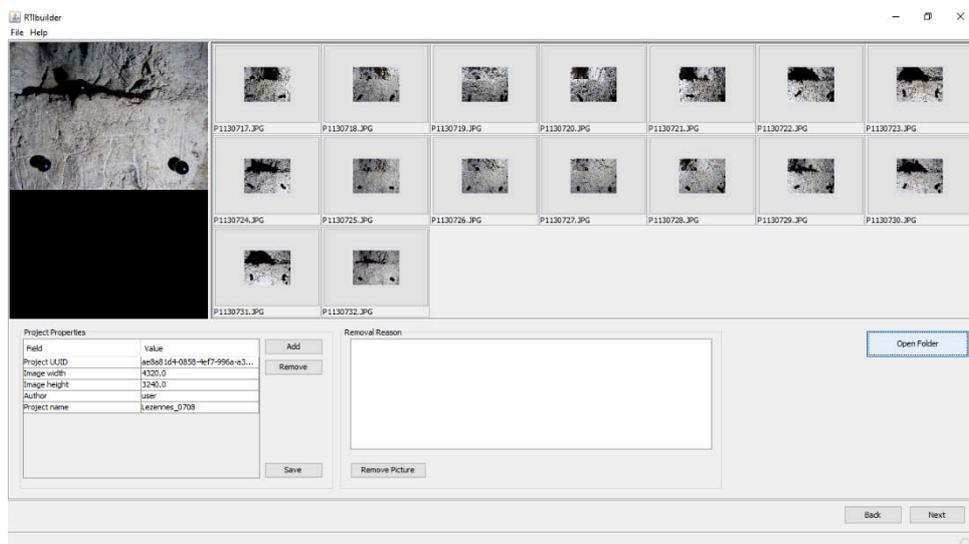
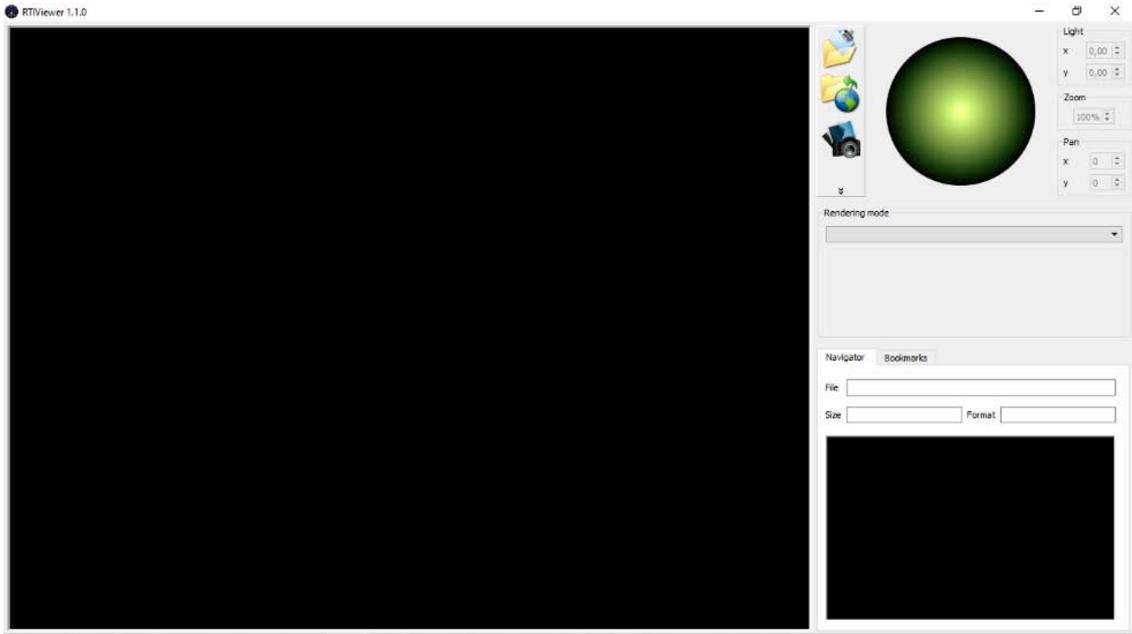


Figure 28 : interface du logiciel RTI Builder

Cette séquence va détecter les sphères sur chaque photo, détecter le reflet et la position de la lumière, pour enfin créer un fichier PTM lisible dans RTI Viewer (Figure 29).



*Figure 29 : interface du logiciel RTI Viewer*

## Résultats et discussion

Aux mois de février, mars, juin et juillet, des visites ont pu être effectuées dans les carrières lilloises avec le Service Commun des Carrières de la Mairie de Lille dans le cadre strict de leurs missions d'inspection, et dans les carrières de la Malogne avec les bénévoles de l'ASBL « Projet Malogne ». Grâce à leur disponibilité, quatorze descentes au total ont pu être réalisées durant le stage, malgré les restrictions de déplacement. Toutes les visites ont permis de tester la photogrammétrie sur toutes sortes de configurations : pilier, fontis, chambre complète, catiche... Toutes les dates, les contextes et les objectifs des visites sont présentées dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : liste des visites en carrières souterraines réalisées dans le cadre de ce stage*

Date	Commune	Nom de la carrière ou secteur	Accompagnateurs <sup>1</sup> (hors encadrants)	Travail réalisé
14/02/2020	Lezennes	Centre Bourg / Autel des Scouts		2 modèles pris en photo
20/02/2020	Faches-Thumesnil	Carrière privée d'un particulier, rue Joffre		2 modèles pris en photo
24/02/2020	Lezennes	Centre Bourg et Lac Bleu		4 modèles pris en photo
07/03/2020	Cuesmes	La Malogne	ASBL	3 modèles pris en photo
11/03/2020	Lezennes	Pasteur Nord	SCC	2 modèles pris en photo
04/06/2020	Lezennes	Centre Bourg et Autel des Scouts		RTI, 5 essais réalisés
08/06/2020	Hellemmes (Lille)	Carrière Herriot	SCC	2 modèles pris en photo
20/06/2020	Cuesmes	La Malogne	ASBL	3 modèles pris en photo
22/06/2020	Lille-Sud	Don Bosco	SCC	1 modèle pris en photo
23/06/2020	Loos	Puits Lino	SCC	2 modèles pris en photo
07/07/2020	Loos	Puits Lino	SCC	
10/07/2020	Cuesmes	La Malogne	ASBL	2 modèles pris en photo
16/07/2020	Cuesmes	La Malogne	ASBL, CEREMA, Université de Mons, ISSeP	
07/08/2020	Lezennes	Centre Bourg Lac Bleu		Pour la RTI, 2 essais réalisés

<sup>1</sup> ASBL : Association « Projet Malogne » ; SCC : Service Commun des Carrières

### A. Retour sur la photogrammétrie

Le Tableau 2 ci-dessous présente les données et résultats obtenus en photogrammétrie après traitement des photos dans le logiciel Metashape.

Tableau 2 : présentation des données et résultats des essais en photogrammétrie

Prise de vue		Modèle 1	
Date et lieu	Objet	Données	Commentaire
14/02 Lezennes	Généalogie Lefebvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (44/44 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (48,523 points)</li> <li>📍 Nuage dense (12,870,781 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (1,258,543 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie</li> <li>-Inscriptions nettes, ce qui n'est pas le cas pour les blocs rocheux</li> </ul>
	Barbe capucins	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (16/16 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (19,502 points)</li> <li>📍 Nuage dense (4,556,064 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (911,212 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie</li> <li>-Texture floue, absence de trépieds</li> </ul>
20/02 Faches-Thumesnil	Catiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (137/137 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (84,144 points)</li> <li>📍 Nuage dense (10,311,020 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (1,951,364 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bouchon de la catiche non reconstitué</li> <li>-Texture manquant de détails</li> </ul>
	Puits à eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (84/84 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (97,212 points)</li> <li>📍 Nuage dense (23,381,146 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (4,676,210 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très grands volumes car deux chambres composent le modèle</li> <li>-Alignement des points et reconstruction réussis, mais texture vraiment floue</li> </ul>
24/02 Lezennes	Chambre ancienne inscription	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (36/70 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (21,597 points)</li> <li>📍 Nuage dense (9,722,320 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (1,944,454 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement des photos totalement raté (Figure 30)</li> </ul>
	Galerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (150/150 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (153,173 points)</li> <li>📍 Nuage dense (25,874,999 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (5,174,971 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bien reconstruit, mais blocs rocheux trop adoucis</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (59/59 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (68,303 points)</li> <li>📍 Nuage dense (18,872,780 points, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement des points et création d'un nuage de points réussis à partir de photos capturées au centre</li> <li>-Seul bémol au toit au-dessus du centre, il existe un vide d'information</li> </ul>
	Fontis	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (57/57 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (57,478 points)</li> <li>📍 Nuage dense (7,489,426 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (808,918 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie</li> <li>-Les blocs à terre sont trop adoucis</li> <li>-Le ciel du fontis est quant à lui très net</li> </ul>
	Puits à eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (110/110 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (141,579 points)</li> <li>📍 Nuage dense (22,551,779 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (3,125,592 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie</li> <li>-Texture et détails satisfaisants de loin</li> </ul>
11/03 Lezennes	Pilier	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (102/102 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (110,563 points)</li> <li>📍 Nuage dense (10,808,351 points, Qualité moyenne)</li> <li>📍 Modèle 3D (1,527,925 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très bien reconstruit et bonne texture</li> </ul>

Prise de vue		Modèle 1	
Date et lieu	Objet	Données	Commentaire
	Puits	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (126/126 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (93,921 points)</li> <li>📊 Nuage dense (11,832,867 points, Qualité moyenne)</li> <li>📐 Modèle 3D (2,100,996 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie mais bouchon du puits absent</li> <li>-Texture satisfaisante</li> </ul>
07/03 Malogne	Galerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (127/127 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (137,801 points)</li> <li>📊 Nuage dense (83,415,388 points, Qualité haute)</li> <li>📐 Modèle 3D (12,185,259 faces, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bien reconstruit malgré quelques lacunes</li> <li>-Mauvaise texture malgré la haute qualité</li> </ul>
	Champignonnière	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (32/42 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (24,693 points)</li> <li>📊 Nuage dense (10,992,249 points, Qualité moyenne)</li> <li>📐 Modèle 3D (2,198,426 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	-Alignement raté
	Champignonnière	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (83/85 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (76,241 points)</li> <li>📊 Nuage dense (17,805,377 points, Qualité moyenne)</li> <li>📐 Modèle 3D (3,561,064 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement réussi</li> <li>-Reconstruction ratée, la forme générale semble avoir été retrouvée, mais beaucoup de lacunes</li> </ul>
08/06 Herriot	Chambre	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (115/115 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (54,796 points)</li> <li>📊 Nuage dense (87,339,517 points, Qualité haute)</li> <li>📐 Modèle 3D (14,746,966 faces, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement réussi</li> <li>-Reconstruction ratée, beaucoup de lacunes</li> </ul>
	Chambre	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (121/121 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (56,868 points)</li> <li>📊 Nuage dense (112,448,125 points, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement réussi et reconstruction réussis</li> <li>-Texture non satisfaisante</li> </ul>
20/06 Malogne	Diabolo	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (5/13 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (3,087 points)</li> <li>📊 Nuage dense (56,094 points, Qualité la plus basse)</li> <li>📐 Modèle 3D (16,104 faces, Qualité la plus basse)</li> </ul>	-Modèle raté
	Champignonnière	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (135/135 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (112,594 points)</li> <li>📊 Nuage dense (64,436,892 points, Qualité haute)</li> <li>📐 Modèle 3D (9,284,177 faces, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Enfin bien reconstituée</li> <li>-Texture non satisfaisante</li> </ul>
	Pilier fracturé	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (10/48 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (10,879 points)</li> </ul>	-Alignement totalement raté
22/06 Don Bosco	Chambre	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (300/300 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (263,271 points)</li> <li>📊 Nuage dense (189,101,046 points, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement et reconstruction réussis</li> <li>-Texture toujours à revoir</li> </ul>
07/07 Loos	Catiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (195/195 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (130,512 points)</li> <li>📊 Nuage dense (39,010,546 points, Qualité haute)</li> <li>📐 Modèle 3D (2,221,715 faces, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bien reconstruit</li> <li>-Texture non satisfaisante (Figure 32, Figure 33)</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (76/76 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (71,930 points)</li> <li>📊 Nuage dense (5,893,495 points, Qualité moyenne)</li> <li>📐 Modèle 3D (361,511 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Prise de photos uniquement à partir du centre</li> <li>-Alignement réussi</li> <li>-Le sol n'est pas présent</li> <li>-Toujours problème de texture</li> </ul>

Prise de vue		Modèle 1	
Date et lieu	Objet	Données	Commentaire
	Catiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (162/163 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (162,424 points)</li> <li>📄 Cartes de profondeur (162, Qualité moyenne, Filtrage)</li> <li>🔷 Modèle 3D (50,000 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reconstruction réussie malgré quelques lacunes</li> <li>-Texture non satisfaisante</li> </ul>
10/07 Malogne	Pilier fracturé	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (63/63 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (77,902 points)</li> <li>📄 Nuage dense (1,938,323 points, Qualité basse)</li> <li>🔷 Modèle 3D (35,748 faces, Qualité basse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capturé avec un téléphone</li> <li>-Alignement réussi</li> <li>-La géométrie n'a pas été retrouvée</li> <li>-La texture est bonne sur les parties bien reconstruites</li> </ul>
	Pilier diablo	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (90/90 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (87,250 points)</li> <li>📄 Nuage dense (6,440,223 points, Qualité moyenne)</li> <li>🔷 Modèle 3D (1,129,613 faces, Qualité moyenne)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capturé avec un téléphone</li> <li>-Modèle réussi</li> </ul>
16/07 Malogne	Fontis	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (127/127 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (91,161 points)</li> <li>📄 Nuage dense (60,855,850 points, Qualité haute)</li> <li>🔷 Modèle 3D (1,895,799 faces, Qualité haute)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Modèle réussi</li> <li>-Bonne texture (Figure 31)</li> </ul>
07/08 Lezennes	Fontis	<ul style="list-style-type: none"> <li>📁 Caméras (75/75 aligné)</li> <li>📍 Points de liaison (54,821 points)</li> <li>📄 Nuage dense (10,384,105 points, Qualité moyen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignement réussi</li> <li>-La reconstruction n'a pas été tentée car il s'agissait d'exploiter uniquement le nuage de points</li> </ul>



Figure 30 : capture d'écran de la reconstruction ratée de la chambre capturée à Lezennes

Figure 31 : capture d'écran de la texture du fontis capturé à la Malogne

24 modèles 3D sont issus de ces derniers mois de stage. Il a fallu pour chacun d'entre eux plusieurs heures de traitement. Concrètement, la texture n'est pas satisfaisante pour bon nombre de ces modèles. Des recherches ont été effectuées au cas où il se serait agi d'un problème de logiciel, la solution ainsi trouvée était de décimer le mesh du modèle à 50 000

faces ou moins, vu que le nombre de faces est important pour chacun des modèles (1 129 613, 3 561 064...), mais cela n'a rien donné de concluant.

Une autre chose à optimiser concerne les conditions de prise de vue. Tout d'abord, les conseils sur la façon de prendre le modèle en photo. Il était impossible en carrières de suivre les consignes indiquées pour l'utilisation du logiciel Metashape, qui préconisaient une position dans l'espace pour une photo, et de rester perpendiculaire à la zone prise en photo. Les modèles, pourtant capturés avec toutes les manières proscrites, ont été très bien reconstruits dans l'espace.



Figure 32 : capture d'écran de la texture de la catiche à Loos



Figure 33 : zoom sur la texture de la catiche à Loos

Certains objets 3D, des galeries par exemple, ont même été réalisés à partir du centre seulement (Figure 34, Figure 35). Le point négatif d'une prise de vue à partie du centre et le manque de données en ce centre.



- Caméras (150/150 aligné)
- Points de liaison (153,173 points)
- Cartes de profondeur (150, Qualité moyenne, Filtrage léger)
- Nuage dense (25,874,999 points, Qualité moyenne)
- Modèle 3D (4,933,849 faces, Qualité moyenne)

Figure 34 : vue du dessus d'une galerie 3D capturée sous différents points de l'espace, et les données associées



*Figure 35 : vue du dessus d'un nuage de point de galerie capturée au centre, et les données associées*

L'éclairage doit en réalité beaucoup jouer sur la qualité de la texture. Sur le terrain a pu être constaté que les projecteurs au sol peuvent créer beaucoup de zones d'ombre, ou ne pas éclairer correctement la zone souhaitée. Il est parfois compliqué de les positionner correctement à cause d'un sol chaotique et l'orientation qu'on peut leur donner une fois posés sol est parfois limitée par l'environnement. Ainsi le recours à des trépieds pour positionner les projecteurs a été envisagé. Une solution avait été envisagée en adaptant ces derniers sur des trépieds de tachéomètre, mais ceux-ci se sont révélés beaucoup trop encombrants pour le contexte des carrières lilloises, étant donnée les conditions d'accès pour certaines (puits, ...) ou de cheminement (plafonds bas, zones où il faut ramper, ...).

Autre point essentiel : les difficultés rencontrées sur le terrain. Le transport de matériel sous terre est un facteur contraignant. L'utilisation d'un trépied a posé un certain nombre d'interrogations. Tous les modèles réalisés avec l'appareil photo du laboratoire (bridge Lumix FZ-45), couplés à un trépied, ne sont pas très satisfaisants. Un fontis capturé à la Malogne a cependant un rendu encourageant, pour lequel les blocs sont bien visibles et bien nets. Or ce dernier a été pris en photo avec l'appareil photo de Philippe Manceaux, bénévole de l'ASBL « Projet Malogne » et accompagnateur lors des descentes. Il s'agit d'un Nikon D3500, qui avait une sensibilité ISO réglée sur 400, un temps d'exposition à 1/30, une focale de F/3.5. Aucun trépied n'a été utilisé, le sol étant beaucoup trop en pente et accidenté, et l'espace restreint. Ainsi le trépied semble être une contrainte et un facteur limitant au niveau des possibilités. En effet, un certain nombre des sites ou de chambres intéressants a été écarté dans cette étude car la configuration ne convenait pas avec l'utilisation d'un trépied, sans compter la gêne que crée le transport d'un trépied en souterrain. Le trépied pourrait donc être en option, dès lors que l'appareil photo permet de prendre des photos nettes sans celui-ci.

En appliquant la photogrammétrie dans les carrières, l'intérêt était d'effectuer un suivi des désordres en plus de garder en mémoire une partie du patrimoine des carrières souterraines. L'idée première concernant les désordres était de pouvoir comparer une zone analysée par photogrammétrie au même endroit, à un temps zéro, puis après 3 et 6 mois, ce qui n'a pas été possible compte tenu des conditions de déroulement du stage imposées par le confinement sanitaire.

Outre la comparaison simplement visuelle, une autre perspective avait été celle de pouvoir mesurer sur le modèle, et de comparer ainsi les volumes si cela avait été possible. Or l'objet n'est pas géoréférencé, et c'est à l'utilisateur de rentrer manuellement des mesures prises sur le terrain. Cet exercice ne fût pas un franc succès avec Metashape : l'ajout de point étant compliqué avec la perspective du modèle 3D, et Metashape ne voulant pas enregistrer la longueur donnée ! Qui plus est avec cette méthode, il ne faut pas être exigeant avec la précision, des erreurs pouvant survenir lors de la prise de mesure, de l'ajout des points, et ce entre le premier et le second modèle.

Une autre solution, découverte tardivement suite à la visite du 16 juillet à la Malogne avec le CEREMA, serait celle d'utiliser le logiciel CloudCompare. Il s'agit d'un logiciel open-source de gestion et de comparaison des nuages de points 3D (Girardeau-Montaut *et al.*, 2018). Il permet notamment de calculer les distances locales entre deux nuages de points denses ou entre un nuage et un mesh. Ainsi CloudCompare a déjà été utilisé par le CEREMA dans un rapport datant du 17/05/2018 (Lienard et Lefebvre, 2018) dont l'objectif était de suivre l'évolution d'une voûte de catiche. Des relevés ont été effectués à plusieurs mois d'intervalle, avec la photogrammétrie et le scanner 3D. Il a été conclu qu'il est possible de visualiser la disparition dans l'espace d'objets, même petits d'environ 5 mm.

Pour tester CloudCompare, il fallait retourner rapidement dans les carrières, capturer à nouveau un modèle relativement réussi, avec un temps d'intervalle suffisant pour espérer visualiser les différences : le fontis de Lezennes, initialement photographié le 24/02, a fait l'objet d'une nouvelle prise de vue le 07/08. Seulement, l'ordinateur mis à disposition par l'Université de Lille n'a jamais voulu ouvrir CloudCompare, affichant un message d'erreur, et les ordinateurs personnels ne sont pas assez puissants pour gérer deux objets 3D ouverts à la fois. L'utilisation de CloudCompare permettrait certainement de suivre les désordres dans les carrières.

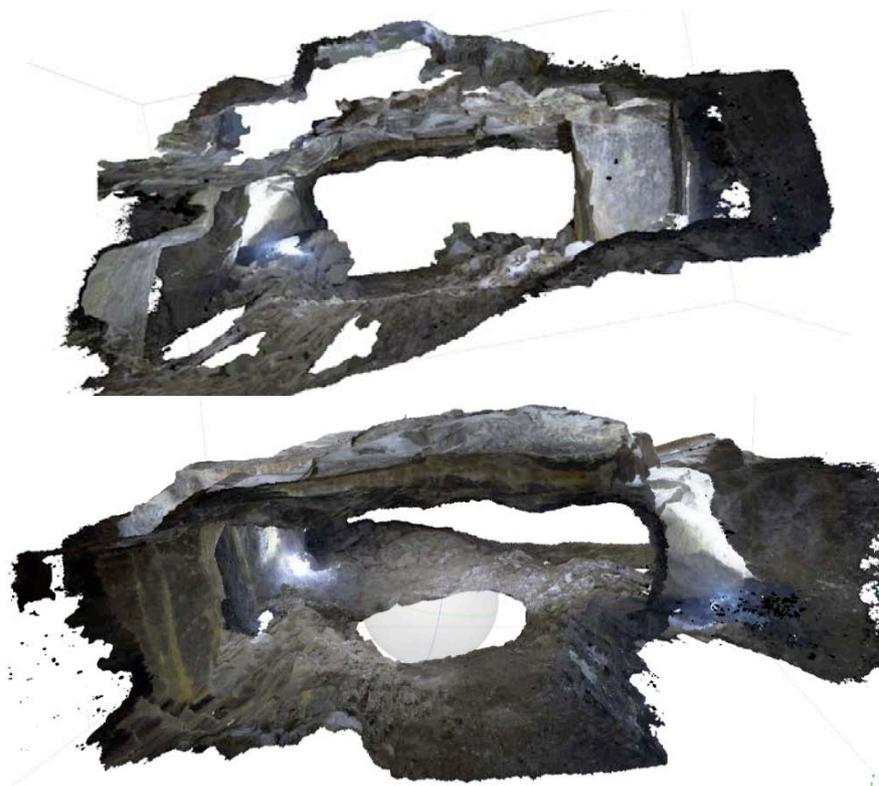
## B. Approfondissement sur les carrières du projet

Les chambres capturées dans la carrière Herriot ne sont vraiment pas satisfaisantes (Figure 36 et Figure 37) : la reconstitution est approximative malgré l'alignement réussi des photographies, et la texture est bâclée. Malheureusement, il n'a pas été possible d'y retourner pour faire de nouvelles prises de vue avant la fin du stage.



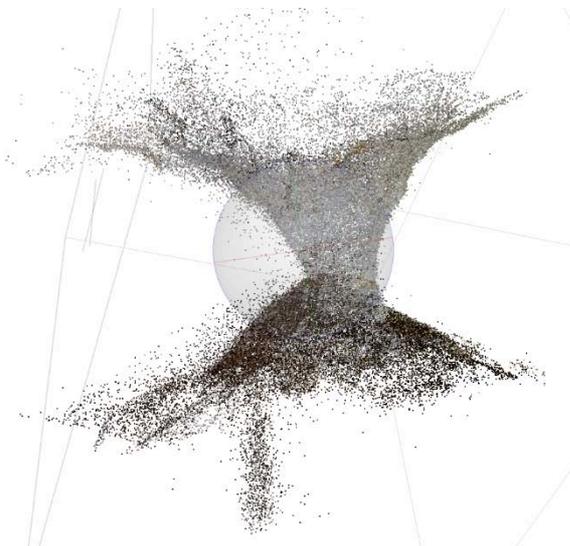
*Figure 36 : capture d'écran de la texture d'un modèle 3D de la carrière Herriot*

Ce qui n'a pas été le cas dans la carrière de la Malogne, qui compte parmi les modèles reconstruits, une galerie avec de hauts piliers, un fontis, une champignonnière et un pilier en diablo. Ces deux derniers participent respectivement à la sauvegarde du patrimoine et au suivi des désordres. Mais certains modèles ont dû être capturés 2, 3 fois, ou ont demandé de changer d'appareil photo avant d'aboutir à un résultat.



*Figure 37 : capture d'écran d'une chambre 3D de la carrière Herriot*

Les étapes de reconstruction du pilier en diabolo ont été sauvegardées. Sur la Figure 38, il s'agit du nuage de brut, lequel va être un peu nettoyé de ses points épars, avant de passer au maillage sur la Figure 39. Enfin le résultat final (Figure 40) est plutôt concluant en ce qui concerne la texture, mais de l'ombre peut gêner la visualisation. Il aura fallu capturer 2 fois ce pilier, deux fois avec le Lumix FZ-45 en vain, une dernière fois avec un simple téléphone (Samsung S8). Il a permis de prendre des photos à partir de points dans l'espace qui étaient peu accessibles avec un trépied, le pilier se trouvant sur une pente très forte, avec de l'eau à sa base. Les photos ont été acquises en tournant autour du pilier. Quoi qu'il en soit, ce pilier est un très bel exemple des désordres qui peuvent subvenir dans une carrière souterraine. Sa prise de vue tardive n'a pas permis durant le stage d'effectuer un suivi de son état, mais il peut en être le point de départ.



*Figure 38 : nuage brut du pilier en diabolo*

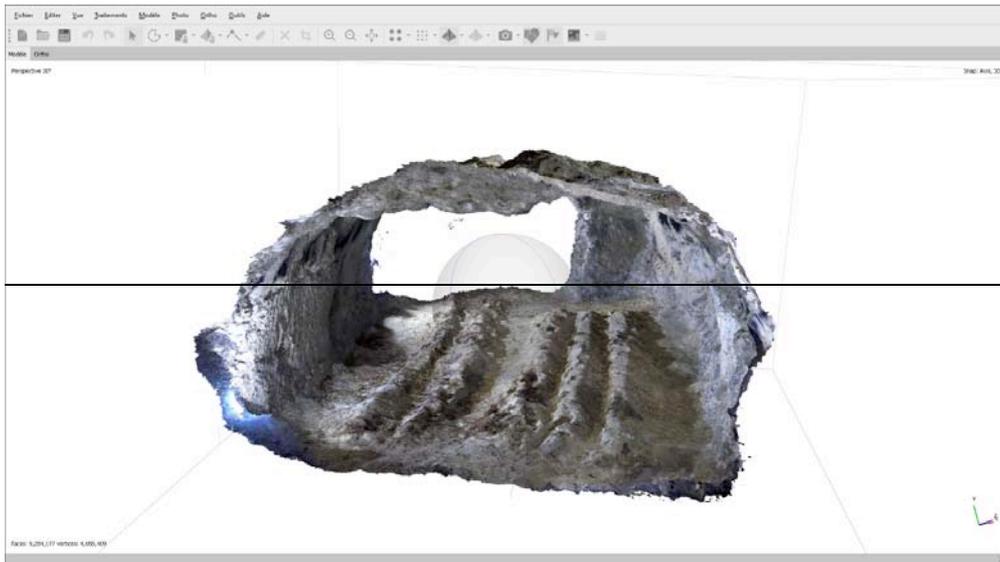


*Figure 39 : maillage du pilier en diabolo*

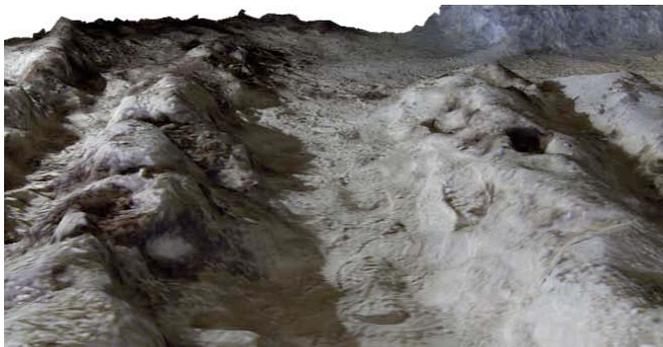


*Figure 40 : pilier en diabolo reconstitué*

La champignonnière a elle aussi été difficile à capturer, il a fallu deux essais, le deuxième semble être le bon au niveau de la reconstruction, il n'y a pas de lacunes, la géométrie est respectée... Mais, la texture n'est pas assez précise (Figure 41 et Figure 43). Pour essayer de régler ce problème, le mesh a été décimé (à 50 000 faces puis la texture reconstruite (Figure 42). Cela n'a pas été concluant, au contraire, la réduction du nombre de faces a encore fait diminuer la qualité.



*Figure 41 : reconstitution 3D de la champignonnière*



*Figure 42 : texture de la champignonnière avec 50 000 faces*



*Figure 43 : texture de la champignonnière avec 9 284 177 faces*

### **C. RTI**

7 essais en RTI ont été réalisés. Aucun n'a été réellement concluant. Le premier problème qui se pose est celui de la taille des sphères noires qui doivent mesurer sur la photo au moins 250 pixels. Cela n'a pu être vérifié qu'après les prises de vue, et ce critère non négligeable supprime 4 des essais.

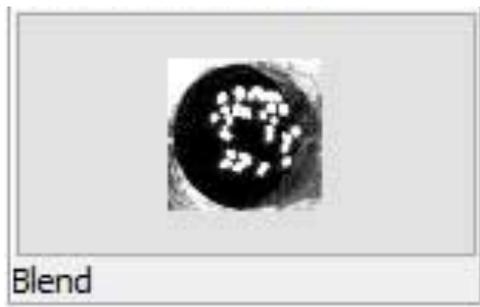


Figure 44 : 39 positions de lumière détectée sur une sphère noire

Un autre problème rencontré sur le terrain concerne le nombre de photos. Il faut donc toute une série de photos qui suivent la forme d'un dôme. Avec ce critère, la taille des sphères trouvées ne permet pas de capturer de grandes inscriptions par la technique RTI. Ceci implique que l'appareil photo doit être proche du mur de la carrière,

laisse peu de liberté de mouvement quant aux déplacements de la source lumineuse, et limite le nombre de photos à prendre.

Une solution pourrait être trouvée en utilisant un le zoom de l'appareil photo. Le zoom est proscrit en photogrammétrie et n'a pas été tenté en RTI.

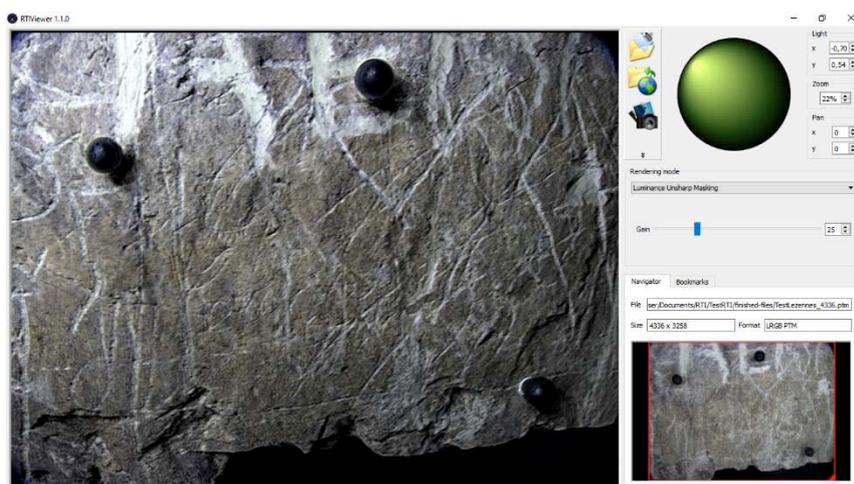


Figure 45 : fichier PTM avec le mode Luminance Unsharp Masking

Sur les 3 essais qui avaient une taille de sphère suffisante, seul un a produit un fichier PTM. Il a été réalisé avec la détection de lumière sur 39 photos (Figure 44). Le résultat sur RTI Viewer donne quelque chose de flou, qui n'aide pas à la visualisation de l'inscription (Figure 45 et Figure 46). Le mauvais rendu peut être dû à l'une ou plusieurs des raisons suivantes :

- un nombre insuffisant de photographies, donc au nombre insuffisant de positions différentes de la lumière,
- le trépied qui a pu bouger ne serait-ce que de quelques millimètres,
- l'appareil photo qui n'est pas assez perpendiculaire par rapport à l'inscription,
- la lumière qui est peut-être trop intense, ou pas assez.

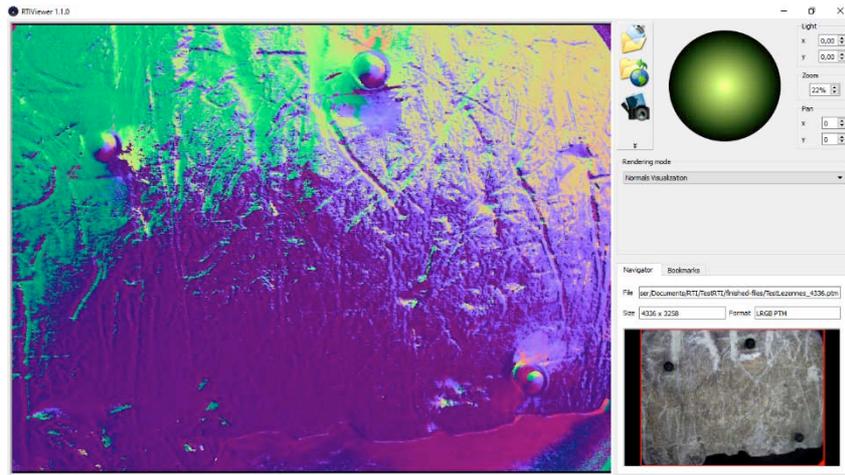


Figure 46 : fichier PTM avec le mode Normals Visualization

Les deux autres essais n'avaient que 16 et 13 photos, aucun fichier PTM n'a pu être produit (Figure 47).

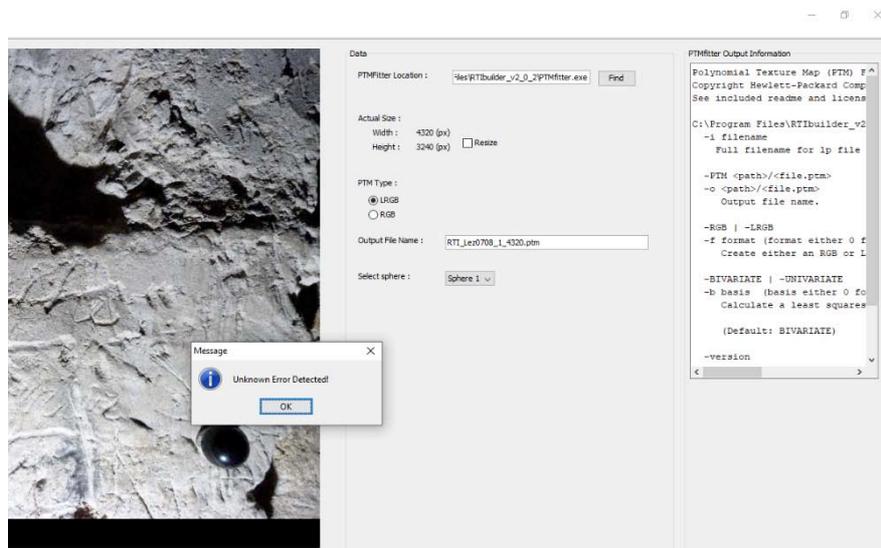


Figure 47 : erreur lors de la création de fichier PTM

## Conclusion

---

Les objectifs du stage étaient de réussir à mettre en place la photogrammétrie dans le suivi des carrières souterraines, sauvegarder une partie du patrimoine toujours à l'aide de cette méthode, et expérimenter la RTI sur des inscriptions illisibles.

Les obstacles rencontrés au cours du stage, n'ont pas permis l'aboutissement total de celui-ci, notamment pour la mise en place de la photogrammétrie afin d'effectuer un suivi. Cependant, avec le matériel adéquat et le logiciel CloudCompare, cette technique peut être très prometteuse. En ce qui concerne la sauvegarde du patrimoine, la texture des modèles tridimensionnels est à améliorer, grâce à une meilleure maîtrise du logiciel Metashape, ou un appareil photo à haute résolution, voire les deux. Autant pour la photogrammétrie la technique était relativement maîtrisée sur le terrain, autant les tests de la RTI ont été effectués avec tâtonnements, dû au milieu spécial des prises de vue et à la nouveauté de la technique. De nombreux résultats ont été concluants comme dans l'étude du lapidaire sur le site de Phaselis (Akçay, 2015). Il serait vraiment intéressant de réussir à faire de même dans les carrières souterraines, notamment lilloises, au vu du nombre d'inscriptions qui s'y trouvent. Les buts étant toujours sauvegarder une trace de certains visiteurs, part du patrimoine souterrain, et la possible découverte de nouvelles dates pourrait aider à retracer l'historique de l'utilisation de ces carrières.



## Références bibliographiques

---

- Agisoft (Ed.), 2019. « Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 1.5 ». Agisoft LLC, 145 p  
[https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf)
- Akcay, A., 2015. « RTI in epigraphy: Phaselis example ». SOMA 2015, 19<sup>th</sup> Symposium on Mediterranean Archeology (*poster*)  
[https://www.academia.edu/18723292/RTI\\_in\\_EPIGRAPHY\\_PHASELIS\\_EXAMPLE](https://www.academia.edu/18723292/RTI_in_EPIGRAPHY_PHASELIS_EXAMPLE)
- Barras, J., 2018. « Patrimoine historique d'un secteur de carrières souterraines de la commune de Lezennes (Métropole de Lille) ». Rapport de stage de licence Sciences de la Terre, Université de Lille, 20 p.
- Bessac, J.-C., 2010. « Les outils du travail de la pierre et leurs traces à l'époque gothique : le point de vue d'un archéologue tailleur de pierre ». *Archeologia dell'architettura*, 13: 115-24
- Bivert, B., 1999. Les souterrains du Nord. Nord patrimoine Editions, 175 p.
- Bouhier, M. et Méaudre, J.-C., 2019. « Elaboration d'un outil d'acquisition RTI open source (Reflectance Transformation Imaging) ». IRAMIS-Saclay Institute of Matter and Radiation (*page web*)  
[http://iramis.cea.fr/en/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_technique.php?id\\_ast=3085](http://iramis.cea.fr/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=3085)
- BRGM (Ed.), 2017. « Cavités souterraines : un risque pour les constructions et les populations ». In : « Enjeux des géosciences », dossier thématique, 7 pp.
- INERIS (Ed.), 2014. « Cavités souterraines du Nord: définition et gestion ». 26 p.  
[https://www.nord.gouv.fr/content/download/23981/157122/file/Cav%20Sout%2059\\_Phase%201\\_Sensibilisation.pdf](https://www.nord.gouv.fr/content/download/23981/157122/file/Cav%20Sout%2059_Phase%201_Sensibilisation.pdf)
- Cherkaoui, A. et Herbaux, M., 2018. « Aléa versant rocheux sous-cavé: caractérisation et évaluation ». INERIS / CEREMA, 68 p.  
[https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Guide\\_VSC\\_A4\\_V15\\_web.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Guide_VSC_A4_V15_web.pdf)

- Comentale, B. 2019, « Les anciennes carrières de pierre en ville, un élément du géopatrimoine: exemples de Paris et de Nantes ». *Physio-Géo*, 13: 24 p.  
<https://doi.org/10.4000/physio-geo.7198>.
- C.R.H.L, 2009. « Voyage au coeur de Lezennes : chronique des carrières souterraines ». Ed. Cercle de Recherche Historique Lezennois, 223 p.
- Dubois, M., 2009. « Les carrières de Lezennes, une fenêtre sur le sous-sol de la région de Lille ». In : « Des roches aux paysages dans le Nord-Pas-de-Calais : richesse de notre patrimoine géologique », (Eds Robaszynski, F. et Guvetant, G.), Société Géologique du Nord / Conservatoire de Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais, 98-101.
- Georgieva, R., Descamps, F., Gonze, N., Vandycke, S., Ajdanlijsky, G. et Tshibangu, J.P., 2020. « Stability assessment of a shallow abandoned chalk mine of Malogne (Belgium), *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15 p.  
<https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1762752>
- Girardeau-Montaut, D. et 2 auteurs anonymes, 2018 « CloudCompare: manuel utilisateur de la version 2.4 ». 78 p.  
[https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation\\_CloudCompare\\_version\\_2\\_4.pdf](https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_CloudCompare_version_2_4.pdf)
- Guini-Skliar, A., 2003. « Les carrières parisiennes aux frontières de la ville et de la campagne ». *Histoire urbaine*, 8 (2): 41-56
- Inrap (Ed.), 2020. « Synthèse méthodologique : photogrammétrie ». Inrap (*page web*)  
<https://multimedia.inrap.fr/atlas/Nimes/Syntheses/Synthese-methodologique/p-20794-Photogrammetrie.htm>
- Les Maçons Parisiens, 2013. « La pierre dans la construction », 4 février 2013 (*blog*)  
<https://www.lesmaconsparisiens.fr/histoire/la-pierre-dans-la-construction/>.
- Lanzi, L., 2009. « La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D: applications aux sciences forensiques ». Thèse de doctorat, Université de Lausanne, Série criminalistique XXXVIII, 254 p.  
[https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB\\_7CA99759BFE5.P001/REF.pdf](https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_7CA99759BFE5.P001/REF.pdf)
- Leblois, E., Manceaux, N., et Manceaux, P., 2020. « Vestiges de Champignonnières Dans Les Anciennes Carrières Souterraines de La Malogne à Mons/Cuesmes (Hainaut,

Belgique): Synthèse Des Relevés Effectués En 2019-2020 ». *Bulletin de La Société Tournaisienne de Géologie, Préhistoire et Archéologie*, Vol. XVII, N° 1, 43-55

[https://www.academia.edu/43583841/Vestiges\\_de\\_champignonni%C3%A8res\\_dans\\_les\\_anciennes\\_carri%C3%A8res\\_souterraines\\_de\\_la\\_Malogne\\_%C3%A0\\_Mons\\_Cuesmes\\_Hainaut\\_Belgique\\_synth%C3%A8se\\_des\\_relev%C3%A9s\\_effectu%C3%A9s\\_en\\_2019\\_2020](https://www.academia.edu/43583841/Vestiges_de_champignonni%C3%A8res_dans_les_anciennes_carri%C3%A8res_souterraines_de_la_Malogne_%C3%A0_Mons_Cuesmes_Hainaut_Belgique_synth%C3%A8se_des_relev%C3%A9s_effectu%C3%A9s_en_2019_2020).

Leclercq, F., 1991. « L'espace naturel de la Malogne ». *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 100 (3-4), 293-298

[http://biblio.naturalsciences.be/rbins-publications/bulletin-de-la-societe-belge-de-geologie/100%20-%201991/bsbg\\_100\\_1991\\_p293-298.pdf](http://biblio.naturalsciences.be/rbins-publications/bulletin-de-la-societe-belge-de-geologie/100%20-%201991/bsbg_100_1991_p293-298.pdf).

Lienard, I. et Lefebvre, C., 2018. « Apport de la photogrammétrie pour le suivi d'un point sensible en souterrain ». Rapport interne CEREMA

Marlière, R., 1978. « Coupe du Bassin de Mons, inédit. *In* : Carte hydrogéologique de Wallonie, échelle 1/25 000, Mons-Givry 45/7-8, SPW Editions, 104 p.

[http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/document/Notice\\_4578.pdf](http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/document/Notice_4578.pdf)

Moiriat, D., 2001. « Evolution des désordres dans les carrières souterraines abandonnées ». Thèse de doctorat, Université de Paris XI Orsay, Editions universitaires européennes, 341 p.

Mortier, T. (Coord.), 2013. Itinéraire 1: le Grand Mons, Itinéraires pédagogiques du Géoparc du Bassin de Mons. 92 pages. Région Wallonne / UMons / ASBL La Malogne, 92 p.

Mytum, H. et Peterson, J., 2018. « The Application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) ». *Historical Archaeology*, 52, 489503

[https://www.researchgate.net/publication/325214049\\_The\\_Application\\_of\\_Reflectance\\_Transformation\\_Imaging\\_RTI\\_in\\_Historical\\_Archaeology](https://www.researchgate.net/publication/325214049_The_Application_of_Reflectance_Transformation_Imaging_RTI_in_Historical_Archaeology)

Ramadan, G., 2016. « La stabilité et l'évolution des cavités souterraines: sur l'exemple des carrières souterraines de la Métropole lilloise », Thèse de doctorat, Université de Lille, 309 p.

<http://www.theses.fr/2016LIL10067>

RISSC, 2020. « RISSC. Programme de coopération transfrontalière sur les risques sous-sol engendrés par les terrains sous-cavés » (*site web*)

<https://www.rissc-interreg.eu/>

Robaszynski, F., Poels, J.-P. et Martin, M., 1988. « Le gisement de craie phosphatée de Cibly: données nouvelles ». *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 97(1), 9-24

[http://biblio.naturalsciences.be/rbins-publications/bulletin-de-la-societe-belge-de-geologie/097%20-%201988/bsbg\\_nr97\\_1988\\_009-024.pdf](http://biblio.naturalsciences.be/rbins-publications/bulletin-de-la-societe-belge-de-geologie/097%20-%201988/bsbg_nr97_1988_009-024.pdf)

SIGES Seine-Normandie. s. d. « Histoire géologique du Bassin Parisien ». Consulté le 30 août 2020

<http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article255>

Simstar, 2020. « Coalbrook Disaster 1960- Mining Accident Database ». Consulté le 30 août 2020 (*page web*)

<http://www.mineaccidents.com.au/mine-event/160/coalbrook-disaster-1960>

Stevens, L.. 2005. « La Belgique souterraine: un monde fabuleux sous nos pieds ». Editions Labor, 250 p.

Thys, G., 2015. « Carrières souterraines de la Malogne : effondrement généralisé du 22 avril 2015, survenu le long de la voie de chemin de fer 96 A ». *Eco-Karst*, 101, 3<sup>ème</sup> trimestre 2015, 2-4

<http://www.cwepss.org/download/ecoKarst/ecokarst101.pdf>

Valent, C., 2018. « Les nuages de points 3D et meshes ». In : « Numérisation 3D et construction ». BTP Digital, 264 p. (*livre uniquement digital*)

<https://numerisation3d.construction/nuages-de-points-meshs/>

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : présentation des opérateurs du projet RISSC

---

Le projet INTERREG RISSC fédère les acteurs transfrontaliers France-Wallonie-Vlaanderen autour des cavités souterraines pour une amélioration de l'aménagement tant en prévention qu'en gestion d'incidents (Figure 48).

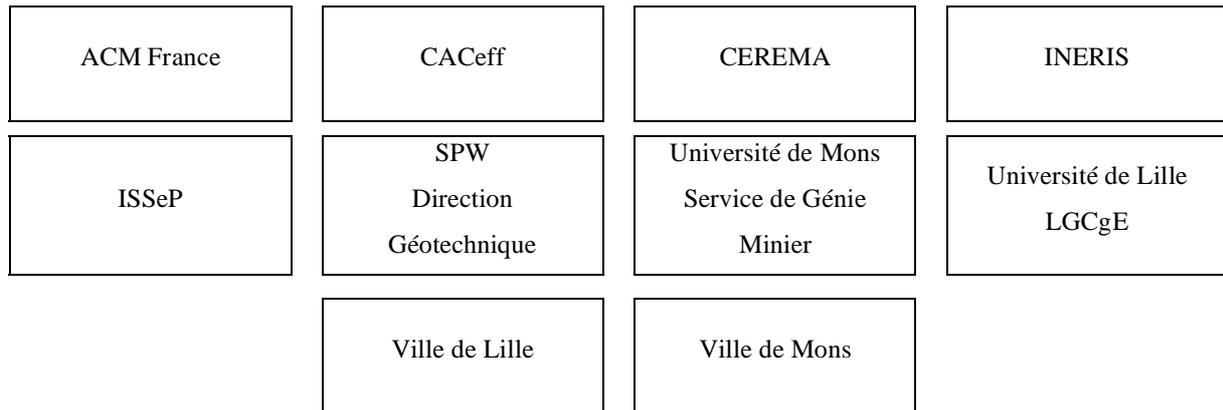


Figure 48 : les différents opérateurs du projet INTERREG RISSC (RISSV, 2020)

Dans le détail, les missions des différents opérateurs sont :

- l'Association des Communes Minières du Nord/Pas-de-Calais (**ACM 59/62**) est une association française regroupant des communes minières de Nord et du Pas-de-Calais. Elle a joué un rôle dans la transition de ces communes à la fin de l'activité minière. Aujourd'hui l'association est active dans le suivi de la gestion des risques miniers, la santé et l'efficacité énergétique des bâtiments,
- le Service Public de Wallonie (SPW), plus particulièrement la Cellule Avis et Conseils Effondrements (**CACEff**) du département de l'Eau mène une réflexion interdisciplinaire sur la gestion et la prévention des risques dus à des mouvements du sol. Ses missions sont de collecter des données, communiquer et informer en matière de gestion et de prévention des accidents. La **Direction de la Géotechnique** fait également partie de ce projet,
- le Centre d'études et d'expertises sur les risques l'environnement, la mobilité et l'aménagement (**CEREMA**) est un établissement français qui a pour mission d'élaborer des plans de prévention des risques (PPR), des cartographies d'aléas,

réaliser des diagnostics de stabilité, et qui met à profit son expérience dans les cavités souterraines pour la rédaction de divers guides,

- l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (**INERIS**) est un établissement français qui cherche à évaluer et prévenir les risques liés aux exploitations souterraines, industries, substances chimiques, exposant l'homme et l'environnement,
- l'Institut Scientifique de Service Public (**ISSeP**) réalise principalement des missions d'appui technique et scientifique destinées aux pouvoirs publics wallon, notamment l'interprétation des données environnementales. Il dispose de compétences et d'expériences en matière d'évaluation des risques issus du sous-sol, tant géologiques que miniers,
- le Service de Génie Minier de **l'Université de Mons** a une expérience de recherche sur la stabilité des ouvrages souterrains, le génie civil et les applications pétrolières. Le-service cherche à modéliser les carrières souterraines afin d'évaluer leur impact en surface,
- le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) de l'Université de Lille mène des recherches pluridisciplinaires pour répondre aux défis de la construction durable, l'aménagement et l'écologie. Le groupe des Sciences de la Terre impliqué dans le projet étudie depuis plusieurs années les carrières de la métropole lilloise, plus spécifiquement les facteurs physiques et chimiques affectant les cavités souterraines et présentant des risques,
- la ville de Lille, plus particulièrement l'expertise du Service Commun des Carrières Souterraines (Service des Risques Urbains et Sanitaires), a hérité en 2017 des archives et de l'expertise de l'ancien Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines (SDICS), permet de prévenir et gérer le risque d'effondrement lié aux des carrières qui représentent une surface de 181 hectares de carrières souterraines (soit un volume de vide estimé à 4,5 millions de m<sup>3</sup>) sur le territoire de 12 communes de la métropole lilloise,
- la ville de Mons confrontée elle aussi aux vides, apporte un point de vue administratif au risque « cavités souterraines ». Elle souhaite collaborer dans les échanges d'informations.

## Annexe 2 : les différents modules du projet RISSC

---

Le projet RISSC se décline en 5 différents modules portés chacun pour un opérateur. Il comprend deux modules de gestion et communication imposés par le programme Interreg et trois modules techniques, chacun des modules étant décliné en plusieurs activités. Une coordination est mise en place à l'échelle de chaque module, le projet étant lui-même coordonné par l'opérateur chef de file, l'ISSeP.

- Module de travail 1 (coordinateur : ISSep) : gestion de projet
  - L'activité consiste à faire en sorte que le projet se déroule dans les conditions optimales pour atteindre les objectifs fixés
- Module de travail 2 (CEREMA, Université de Mons) : activités de communication
  - Activité 1 : réalisation d'un site internet dédié au projet. Le site a été ouvert en 2018 et est accessible à l'adresse : <https://www.rissc-interreg.eu/projet>. Les objectifs du projet, les opérateurs y sont présentés et les événements marquants des actualités y sont régulièrement mis à jour
  - Activité 2 : organisation de colloque. Deux colloques sont prévus au cours de la période du projet. Le premier était une journée technique qui s'est tenue le 14 novembre 2019 à Lille devant environ 80 personnes issues de collectivités territoriales, d'universités, de sociétés savantes, de bureau d'études et de gestionnaires d'infrastructures. Un second colloque est prévu pour clore le projet en 2021

Activité 3 : diffusion et valorisation des résultats. Ce module a pour objectifs de diffuser les résultats sous forme de publications, de communications lors des congrès nationaux et internationaux (par exemple participation aux Journées Nationales de Géotechnique

- Module de travail 3 (ISSep, Université de Mons) : caractérisation des objets et des menaces présents en Wallonie et Hauts-de-France
  - Activité 1 : identification, inventaire et description des cavités et objets souterrains
  - Activité 2 : compréhension des mécanismes de ruine des objets concernés et caractérisation des massifs : caractérisation in-situ et en laboratoire, comportement des terrains de recouvrement, modélisation des effets redoutés

- Activité 3 : évaluation des aléas de mouvement de terrain : échange de bonnes pratiques et application/validation sur une sélection de sites pilotes transfrontaliers représentatifs en Wallonie et Hauts-de-France
- Activité 4 : élaboration d'une base de données commune portant sur les effondrements déjà survenus et analyse accidentologique conjointe
- Activité 5 : étude de l'endommagement des cavités souterraines soumises à l'influence des zones minières sous-jacentes
- Module de travail 4 (INERIS) : développement de solutions locales adaptées pour réduire, voire contrer le risque
  - Activité 1 : bilan des méthodologies et techniques de prévention du risque lié aux cavités
  - Activité 2 : évaluation de l'instrumentation pour le suivi des cavités
  - Activité 3 : solutions alternatives de mise en sécurité
  - Activité 4 : synthèse et valorisation
- Module de travail 5 : mise en place d'un soutien technique à destination des acteurs locaux et de la population
  - Activité 1 : inventaire et comparatif des réglementations et des pratiques en matière de prévention et gestion de risques du sous-sol, et proposition de leur amélioration
  - Activité 2 : structuration d'un réseau transfrontalier d'élus et d'acteurs clés
  - Activité 3 : formulation de recommandations locales et adaptées, pour la prévention et la gestion des risques induits par les objets souterrains
  - Activité 4 : création d'un pôle transfrontalier de connaissances et d'expertises multidisciplinaires
- Activité 5 : actions de sensibilisation et de formation des pouvoirs locaux, des services d'urgence et du public à l'égard des risques du sous-sol