

La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière premiers essais

Équipe : Adrien Arles¹, Fabiano Busdraghi², Julien Guyot³, Juergen Heckes².

La photogrammétrie est une technique qui permet de reconstituer une scène en 3 dimensions à partir d'une série de photographies. Dès 1859, A. Laussedat expose les principes de cette technique devant l'Académie des Sciences⁴. Ce procédé est aujourd'hui utilisé depuis de nombreuses années par l'Institut Géographique National pour produire des cartes topographiques à partir de photographies aériennes. Cependant, les protocoles jusqu'alors mis en œuvre étaient extrêmement lourds. Le relevé en trois dimensions des informations topographiques devait être réalisé à la main par un opérateur. Aujourd'hui avec le développement important de la photographie numérique ainsi que de la puissance des ordinateurs, la production de données tridimensionnelles à partir de photographies peut être presque complètement automatisée.

En archéologie minière, l'accès à des données tridimensionnelles est un apport particulièrement important dans la mesure où une mine se développe, et donc se comprend, dans l'espace. À partir d'une modélisation en trois dimensions, il est possible d'extraire des données jusqu'alors collectées à partir de relevés archéologiques en plan. Cependant, aux relevés de section de galerie, de profil de front de taille et de traces d'outils, on peut maintenant ajouter des informations concernant les volumes extraits et l'organisation des chantiers. En outre, la modélisation 3D peut être utilisée dans un but de valorisation et permettre de présenter au public des lieux difficiles d'accès, voire devenus inaccessibles. Finalement, compte tenu de sa simplicité, cette méthode de relevé présente un grand intérêt à être mise en œuvre en mine puisqu'elle nécessite seulement l'utilisation d'un appareil photo, d'un flash et d'une mire de référence spatiale.

L'objectif initial des campagnes organisées en 2011 est de vérifier la possibilité d'appliquer pour la première fois les méthodes photogrammétriques en archéologie minière⁵. Les conditions de prise de vue notamment en termes d'espace limité et d'éclairage inexistant peuvent *a priori* représenter un inconvénient important. Le second point qui doit être vérifié concerne la précision des modèles tridimensionnels produits. Ceux-ci pourront être utilisés dans une discussion scientifique seulement si leur précision est au moins équivalente à celle des relevés jusqu'alors réalisés en plan à l'échelle 1/20. Enfin, elle a été appliquée à différents cas d'étude propre à l'étude des mines anciennes.

Les essais de 2011 se sont principalement déroulés à Sainte-Marie-aux-Mines (68) dans le cadre du PCR « Altenberg : fonderies et mines d'argent, X^e-XVII^e siècles », mais également à Melle (79) dans le cadre du PCR « Paléométallurgie et expérimentations » et au cours du chantier du Castel-Minier à Aulus (09).

¹ Centre Ernest Babelon, IRAMAT, CNRS-Université d'Orléans.

² Photographe indépendant.

³ [Deutsches Bergbau-Museum](http://www.deutsches-bergbau-museum.de), Bochum, Allemagne.

⁴ Laussedat A., « Mémoire sur l'emploi de la photographie dans la levée des plans », *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, vol. 49, 1859, p. 732-734.

⁵ Les auteurs tiennent à remercier P. Clerc, P. Fluck, F. Téreygeol, responsables des chantiers de Sainte-Marie-aux-Mines, Melle et Aulus pour l'autorisation d'intervenir dans le cadre de leurs opérations, mais également pour l'aide qu'ils ont fournie.

I. Principe de la méthode

Le principe général de la technique photogrammétrique peut être décrit simplement à partir d'une analogie avec la vision humaine. À l'image du cerveau qui permet d'appréhender l'espace à partir des images décalées de chacun des deux yeux, un logiciel peut calculer la position de points dans l'espace en comparant deux photos d'une même scène prises de deux points de vue différents. Il faut donc retenir ici qu'il est nécessaire de prendre en photo au moins deux fois un même point pour qu'il soit placé dans l'espace après traitement informatique. Il n'y a en revanche pas de limite supérieure vis-à-vis du nombre de prises de vue. Au contraire, la multiplication des photos permet d'augmenter la précision globale d'un modèle ainsi que de faciliter le traitement informatique en ajoutant des données complémentaires au modèle⁶.

II. Protocole expérimental

1. Prises de vue sur le terrain

L'une des finalités de nos campagnes photogrammétriques étant de vérifier la précision des données tridimensionnelles qu'il est possible d'obtenir par la technique photogrammétrique en mine, il a été décidé d'utiliser un appareil photographique haute résolution. Nous avons utilisé le boîtier reflex numérique 5D mark II de marque Canon⁷. Il dispose en effet d'un capteur de 21,1 millions de pixel de grande dimension (24 mm x 36 mm). En outre, sa grande sensibilité en faible lumière sans augmentation trop importante du bruit numérique constitue un grand avantage dans le cadre de prises de vue souterraines. Toutes les photos sont enregistrées au format raw de manière à collecter le maximum d'information sur le terrain. Toute l'information de prise de vue est ainsi conservée. Ceci permet de réaliser d'éventuelles corrections d'exposition lors du développement des fichiers de retour au laboratoire.

En ce qui concerne l'objectif, l'utilisation d'un grand angle a été privilégiée, car elle permet de limiter le nombre de photos à prendre pour couvrir la totalité d'une scène. Cet avantage est particulièrement important lors de la modélisation d'espaces exigus propres à la mine. Nous avons utilisé l'objectif Canon EF 17-35mm f/2.8. Les distorsions et effets de perspective propres à cet objectif sont corrigés lors du traitement informatique photogrammétrique (orientation interne, cf. *infra*).

La seule source d'éclairage que nous avons retenue est un flash monté sur l'appareil photo. Il s'agit du speedlite 430exII de marque Canon. Contrairement aux protocoles habituellement préférés en conditions souterraines, l'utilisation ici d'une source unique proche de l'objectif ne représente pas un inconvénient. En effet, si les photos produites n'ont pas un rendu esthétique important puisque les ombrages dessinant les reliefs sont presque inexistantes, elles ont en revanche l'avantage d'enregistrer la totalité des informations radiométrique d'une scène modélisée. Le relief sera obtenu dans un second temps lors du traitement photogrammétrique des photos.

En définitive, l'achat de ce matériel réduit représente un investissement de l'ordre de 3000 euros. Ce qui est très inférieur au coût d'un lasergrammètre qui dépasse les 50000 euros.

À cet équipement très limité qui peut être facilement transporté dans un kit spéléologique, nous avons ajouté une mire spatiale. En photogrammétrie de surface, il est possible d'orienter et de mettre un modèle tridimensionnel à l'échelle en relevant seulement

⁶ Pierrot Deseilligny M., Clery I., « Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels », dans Jaillat S., Ployon E., Villemin T., eds., *Images et Modèles 3D en Milieux naturels*, Le Bourget-du-Lac, Collection Edytem, 2011, t. 12, p. 51-66.

⁷ Les essais réalisés à Melle ont été réalisés avec un appareil reflex Nikon D90 équipé d'un objectif Nikon 18-105 mm f/3.5-5.6.

trois points à l'aide d'un tachéomètre. En souterrain, il n'est pas possible d'utiliser simplement un tachéomètre en particulier pour des raisons d'accessibilité. C'est pourquoi nous avons développé une mire spécialement pour la photogrammétrie en milieu souterrain (Figure 1).



Figure 1 : Mire de référence spatiale en situation, placée à l'horizontale et orientée au nord avant d'être modélisée dans la scène enregistrée.

Il s'agit d'une plaquette articulée par une rotule sur un trépied. Sur le plan ainsi formé, une mire présente trois points de références (Figure 2). C'est à partir de ces trois repères qu'il est ensuite possible de réaliser les opérations de mise en l'échelle et d'orientation lors de la production du modèle 3D. D'autres symboles sont également représentés sur la mire afin qu'elle ait une texture suffisante pour être modélisée par le logiciel. En effet, si elle présentait une surface uniforme, l'algorithme de calcul ne serait pas capable de la situer dans l'espace dans la mesure où il n'arriverait pas à trouver des points semblables de la surface entre les photographies.

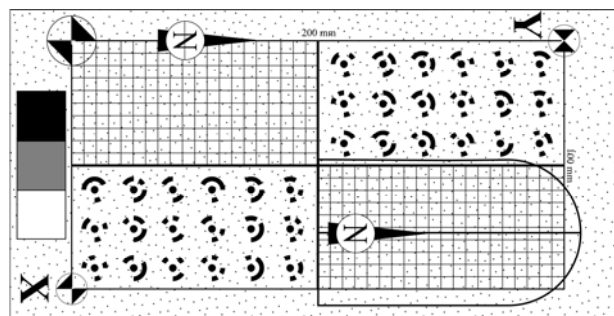


Figure 2 : Mire de référence.

Avant de photographier la scène qui doit être modélisée, la mire spatiale est installée dans l'espace qui doit être enregistré. Un niveau à deux axes permet de disposer le plan de la plaquette à l'horizontale. Une boussole est ensuite utilisée pour orienter vers le nord un axe de référence représenté sur la mire. Après cette installation, la série de prise de vue peut être mise en œuvre en commençant par photographier la mire sous différents angles (Figure 3). C'est en effet à partir de ces premières photos que le logiciel de photogrammétrie pourra reconstituer le plan de référence de la plaquette dans le modèle produit.



Figure 3 : Protocole de prise de vue de la mire spatiale.

Le protocole de prise de vue dépend ensuite des configurations de la scène qui doit être enregistrée. Le principe général est de disposer d'un couple de photographies sous deux angles différents pour l'ensemble des points qui doivent être modélisés. En définitive, il faut au moins avoir photographié la scène globalement deux fois. Il n'y a cependant pas de limite vis-à-vis du nombre de fois qu'un même point est pris en photo. D'ailleurs, la multiplication des vues différentes facilite le traitement logiciel et augmente la précision du modèle⁸. Afin de minimiser les risques d'oubli de zones photographiées, il est important de définir au préalable un protocole de prise de vue avant chaque séquence d'enregistrement. Celui-ci peut être construit à base de paires stéréoscopiques organisées de façon à couvrir l'ensemble de la scène en évitant les zones ombrées (Figure 4).

Pour que le logiciel puisse reconnaître suffisamment de points communs entre les photos pour reconstruire l'espace, il est important de maintenir un fort recouvrement de 60 à 80 % entre les photos.



Figure 4 : Exemple de la série de prises de vues réalisée pour l'essai GB12.

Les réglages de l'appareil photo et du flash sont définis pour favoriser ce recouvrement. Ils doivent permettre d'obtenir une profondeur de champ très importante afin de minimiser les zones floues qui diminuent la proportion de zones homologues entre les photos. Il faut donc privilégier une ouverture de diaphragme très faible compensée par la vitesse d'obturation, la sensibilité de l'appareil, la puissance du flash sans dégrader de manière trop importante la qualité des photos (bruit électronique, zones surexposées par le flash).

Enfin, pour maximiser l'enregistrement d'information sur le terrain, les réglages de prises de vue sont définis de manière à surexposer les photos de 2 stops. Les zones sombres peuvent ainsi être exposées et fournir de l'information et les zones légèrement surexposées peuvent être récupérées lors du développement des fichiers raw.

2. Traitement informatique

La première opération du traitement informatique des données recueillies sur le terrain consiste à développer les fichiers raw. Dans le cadre d'un premier traitement, il a été décidé d'utiliser la fonction de mise à niveau automatique des paramètres d'exposition pour chaque photo. Les réglages consistent principalement à une correction d'exposition des seules zones surexposées. Les photographies sont développées au format tiff sans compression.

Le traitement informatique des données recueillies se décompose ensuite en deux phases. La première permet la production d'un modèle tridimensionnel grâce à une série d'algorithmes développés à partir de la théorie photogrammétrique⁹. Une fois produit le modèle peut ensuite être étudié et exploité dans un second temps.

⁸ Pierrot Deseilligny M., Clery I., « Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation... », *op. cit.*, p. 51-66.

⁹ Les principes et équations de calculs photogrammétriques sont présentés dans deux ouvrages de référence : Kraus K., Waldhäusl P., Grussenmeyer P., Reis O., *Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux*, Paris, Hermès, 1997, 407 p.

a. Logiciels de photogrammétrie

La production d'un modèle tridimensionnel à partir de photographies nécessite l'utilisation de logiciels photogrammétriques. Il existe différentes solutions qui se différencient selon leurs capacités à produire un modèle de qualité, leur coût, leur rapidité, leurs outils permettant d'orienter et de mettre à l'échelle les modélisations... Les logiciels 123D Catch¹⁰ (projet développé par Autodesk) et Photosynth¹¹ (développé par Microsoft) ont été retenus dans cette étude, car ils présentent plusieurs avantages. Il s'agit d'abord d'applications d'utilisation à ce jour gratuite. En outre, la puissance et la rapidité de ces logiciels sont très importantes, car les calculs algorithmiques lourds sont délocalisés chez les fournisseurs de ces applications. Le choix d'utilisation d'un logiciel par rapport à l'autre se détermine en fonction des scènes étudiées.

Le premier logiciel utilisé est la solution 123D Catch d'Autodesk car il permet d'obtenir un nuage de points, un maillage de ce nuage (à partir duquel peuvent être extraites des informations de volume), une texturation photoréaliste de ce maillage (permet d'utiliser le modèle à des fins de valorisation : visite virtuelle). De plus, les outils de mise à l'échelle et d'orientation du modèle produit dans l'espace sont disponibles.

L'utilisation de la solution Photosynth de Microsoft intervient pour l'instant lorsque l'application d'Autodesk ne parvient pas à produire un modèle satisfaisant à partir des photographies collectées. En effet, le logiciel de Microsoft semble plus performant dans les opérations de corrélations d'images. Ce programme a été particulièrement efficace pour traiter des scènes complexes avec de nombreuses photos (cf. *infra* : Mine Saint-Louis, SL01). Cette solution logicielle ne permet cependant d'obtenir qu'un nuage de points. Son orientation et sa mise à l'échelle sont plus difficiles à réaliser qu'avec le logiciel 123D Catch. L'obtention d'un maillage phototexturé nécessite le recours à un logiciel supplémentaire¹².

La chaîne de calcul logicielle se décompose en plusieurs opérations automatisées qui font intervenir différents algorithmes :

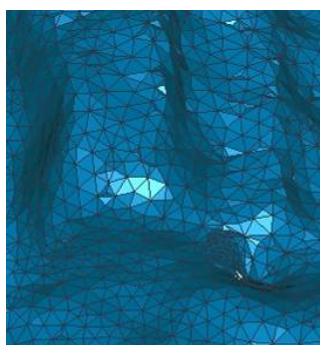
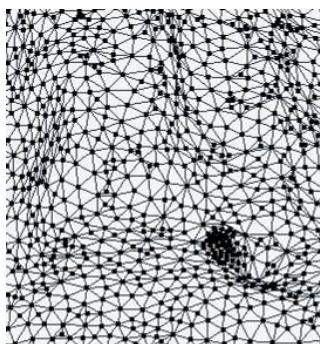
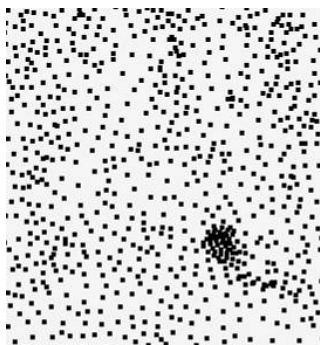
- Au cours de la première opération (orientation ou aérotriangulation), le logiciel va rechercher les points homologues facilement reconnaissables entre chacune des photos de la série utilisée pour le calcul. À partir de ces points de référence, le logiciel détermine la position de prise de vue pour chacune des photos. C'est également à partir des points homologues que sont déterminés les paramètres de correction des déformations d'image par l'objectif utilisé lors des prises de vues (orientation interne).

Kasser M., Egels Y., *Photogrammétrie numérique*, Paris, Lavoisier, 2001, 379 p.

¹⁰ Ce logiciel est actuellement en développement. À ce jour, il est utilisable gratuitement afin d'être évalué par les utilisateurs.

¹¹ L'application internet Photosynth de Microsoft n'a pas été initialement développée pour produire un nuage de points. Cependant, lors du traitement des photos par Microsoft, un nuage de points est tout de même produit et si ces données ne sont pas directement accessibles lors de l'utilisation de l'application, il existe un logiciel libre (SynthExport-1.1.0) qui permet de les récupérer.

¹² Cette opération peut être réalisée avec le logiciel libre Meshlab.



- Dans la seconde opération (autocorrélation) le logiciel va s'appuyer sur les données qu'il a rassemblées lors de l'orientation pour rechercher les pixels homologues entre chaque image. Lorsqu'il repère deux pixels corrélés, il peut placer un point dans l'espace à partir du décalage de position de ce dernier entre chaque photo. Ce calcul est particulièrement lourd puisqu'il est réalisé pour chaque pixel de chaque photographie utilisée dans le traitement. On comprend ainsi l'intérêt du calcul délocalisé chez les fournisseurs des logiciels.

- Lorsque le nuage de points est extrait, différents filtres sont appliqués afin d'éliminer les points incohérents résultant d'erreur logicielle.

- Le nuage de point est ensuite maillé, c'est-à-dire qu'il est transformé en une surface qui permettra à la suite de calculer des volumes et de plaquer des textures. Le maillage est réalisé par triangulation. La surface est constituée de triangles prenant appui sur les points modélisés.

- Le maillage est ensuite amélioré afin notamment de boucher les éventuels trous subsistants dans les zones présentant peu de points.

- Enfin, une texture constituée des photos initialement utilisées dans le calcul peut être plaquée sur ce maillage pour obtenir un modèle photoréaliste.

Les opérations de mise à l'échelle et d'orientation des modèles peuvent être ensuite réalisées à partir de la mire spatiale présente dans les reconstitutions. Lors de l'exploitation du modèle produit par le logiciel, il suffit de définir un nouveau système de coordonnées construit à partir du plan de référence horizontal (Figure 5). Dans un second temps, le modèle peut être mis à l'échelle à partir de la mesure d'une distance connue sur la mire (Figure 6).



Figure 5 : Définition du nouveau système de coordonnées orienté.



Figure 6 : Mise à l'échelle du modèle.

b. Inspection du modèle

À partir d'un modèle tridimensionnel orienté et mis à l'échelle, il est possible d'extraire un certain nombre d'informations précieuses dans l'étude scientifique des mines. Il existe plusieurs solutions logicielles initialement développées pour l'ingénierie mécanique : 3Dresaper, Rapidform XOR3, Geomagic... Nous avons choisi d'utiliser la solution de Rapidform XOR3¹³ qui offre plusieurs outils intéressants d'études des modèles 3D : mesure de longueur, extraction de sections, comparaison de modèles (Figure 7).

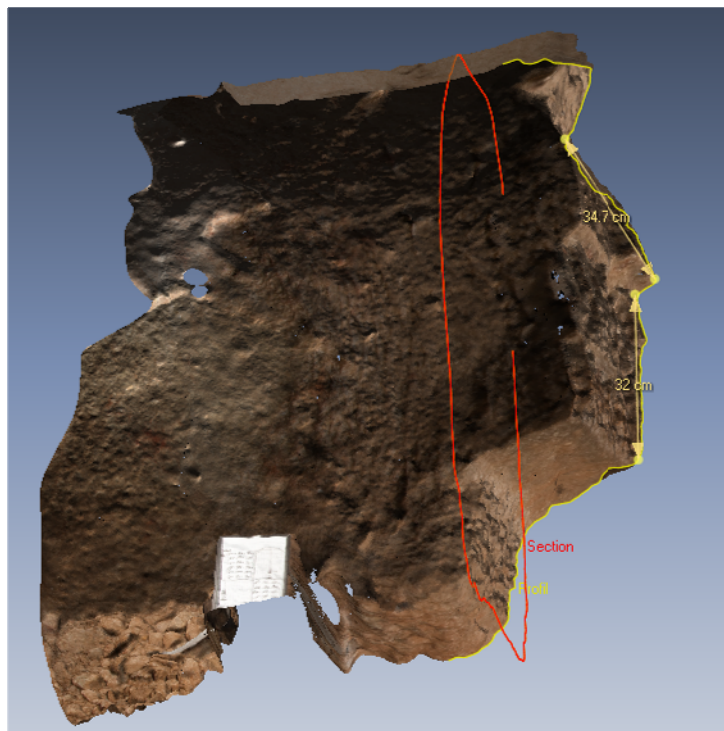


Figure 7 : Section et profil obtenus à partir de la modélisation d'un front de taille d'une galerie de mine.

¹³ Une version gratuite de ce logiciel existe et permet de réaliser la majorité des opérations d'inspection des modèles tridimensionnels : Rapidform Explorer.

III. Essais réalisés à Sainte-Marie-aux-Mines (68)

Au cours d'une semaine d'essais réalisés dans trois mines autour de Sainte-Marie-aux-Mines (Gabe Gottes, Saint-Louis, Mine de zinc), nous avons mis en place plusieurs protocoles afin de répondre à différentes questions :

- Viabilité de la méthode en conditions réelles :
 - + Varier la dimension des espaces modélisés.
 - + Conditions extrêmes : eau, boue, poussière, obscurité.
- Vérifier la précision des relevés en comparant avec des relevés en plan.
- Relever des traces d'outils (microtopographie).
- Relever un puits : protocole à mettre en place.
- Relever une tête de puits : ouverture vers reconstitution virtuelle d'anciens aménagements de travail.
- Application de la méthode à l'archéologie de surface.

Nous avons totalisé 2845 photographies sur une durée de prise de vue cumulée de 9 heures 26 minutes. Ces photos représentent la réalisation de 34 essais détaillés en annexe (Inventaire des essais photogrammétriques) avec le nombre de photos prises ainsi que le temps de prise de vue. Pour chacun des essais, il est aussi indiqué si un modèle a pu être produit à l'aide des logiciels. La majorité des essais a été réalisée dans la mine Gabe Gottes. Ils ont été localisés sur le plan ci-dessous (GBXX).

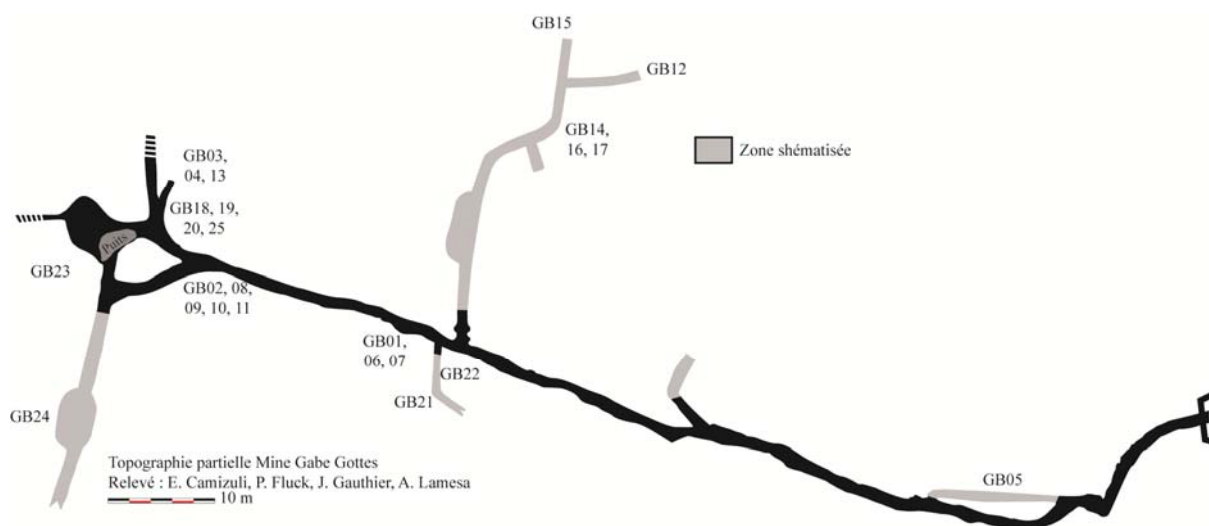


Figure 8 : Plan du travers-banc de la mine Gabe Gottes localisant les essais photogrammétriques.

Les premières expériences ont été traitées à proximité du terrain et n'ont pas permis de produire de modèles tridimensionnels convenables (GB01, 02, 03 et 05). L'observation des photos enregistrées a rapidement permis de mettre en évidence que la profondeur de champ lors de la prise de vue n'était pas suffisante pour permettre un taux de recouvrement satisfaisant entre les images. C'est pourquoi les logiciels ne parvenaient pas à corréler les images entre elles. Le protocole de prise de vue a alors pu être rapidement corrigé pour améliorer la profondeur de champ (fermeture du diaphragme et augmentation de la sensibilité).

À partir de cette correction initiale, il a été possible de réaliser les prises de vue nécessaires pour produire les différents modèles tridimensionnels utilisés dans la discussion des problématiques préalablement définies.

1. Précision des résultats

Si la bibliographie nous indique que la qualité des mesures peut être équivalente à celle qu'il est possible d'obtenir avec un lasergrammètre¹⁴, il était cependant nécessaire de le vérifier pour notre application de la photogrammétrie en archéologie minière suivant le protocole qui a été défini. Pour traiter de cette question nous avons réalisé les relevés en plan à l'échelle 1/10 les profils de deux fronts de taille ainsi que trois sections galeries (Figure 8 : GB12, GB 18)¹⁵. Ces relevés traditionnels peuvent ensuite être comparés aux données obtenues à partir des modèles 3D. La principale difficulté pour réaliser cette comparaison est de pouvoir réaliser les profils sur le terrain et sur le modèle 3D en se plaçant exactement dans le même plan de coupe. Les résultats de nos comparaisons sont présentés dans les figures ci-dessous.

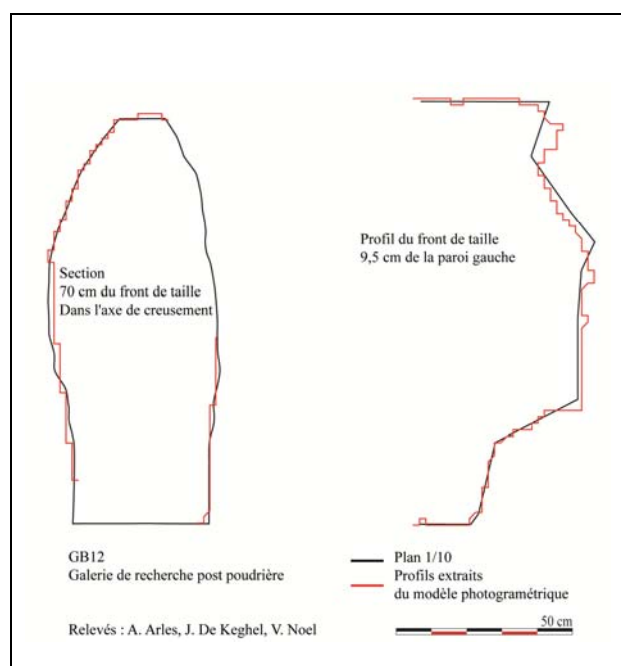


Figure 9 : Comparaison de profil de front de taille et section de galerie GB12¹⁶.

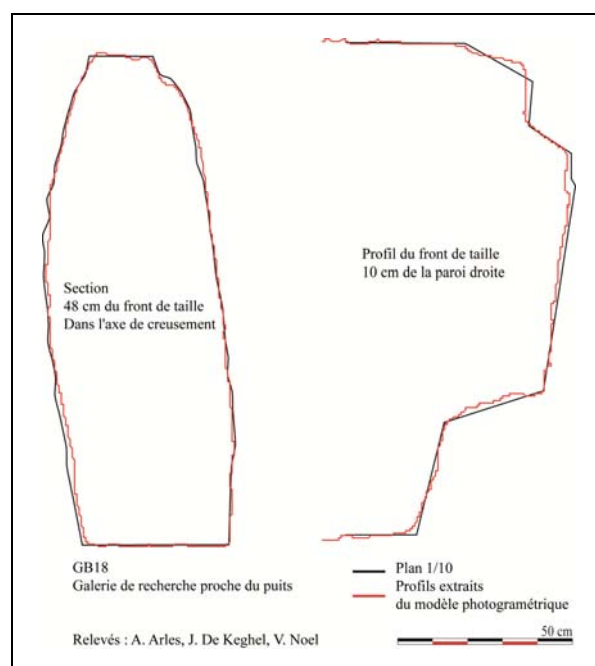


Figure 10 : Comparaison de profil de front de taille et section de galerie GB18.

Globalement, les coupes sont quasi superposables entre elles avec cependant une plus grande imprécision pour les profils de front de taille en particulier dans les parties hautes. Cette dernière observation s'explique certainement par le fait que la taille des galeries étant très limitée, la tête de l'opérateur et donc son point de vue est très proche du plafond. Dans ce cas, il est plus naturel pour ce dernier de photographier vers le bas plutôt que vers le haut. Dans la mesure où les photos vers le bas sont plus nombreuses, la précision dans cette direction est plus grande.

¹⁴Vautier F., Voldoire O., « Comparaison lasergrammétrie/photogrammétrie pour la mesure de l'érosion de pierres de façade - Abbaye de Manglieu, Puy-de-Dôme », dans Jaillet S., Ployon E., Villemin T., eds., *Images et Modèles 3D en Milieux naturels*, Le Bourget-du-Lac, Collections Edytem, 2011, t. 12, p. 199-205.

¹⁵ Les auteurs tiennent à remercier les étudiants Valérie Noel et Julien De Keghel pour leur aide dans la réalisation des relevés.

¹⁶ Les manques dans la section correspondent à la présence de trous dans le modèle au niveau de la position de relevé et à l'ombrage de la mire en position basse.

La confrontation des échelles des différents relevés permet également d'estimer la précision globale de la méthode. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Coupes	Précision %
GB12 section	-1.62
GB12 profil	2.42
GB18 section	-0.40
GB18 profil	-0.40

La précision des relevés photogrammétriques est finalement très élevée. De plus, pour le modèle GB18, l'orientation et la mise à l'échelle ont été réalisées sur la mire placée à l'entrée de la galerie alors que les coupes sont localisées en bout de galerie soit à près de 4 m. La qualité du relevé est donc maintenue à longue distance.

2. Relevé de traces d'outils

Nous avons également choisi de modéliser par photogrammétrie deux portions de paroi du XVI^e siècle qui présentent de nombreux stigmates de creusement (Figure 8 : GB01 et GB02). Cette approche doit justement permettre une étude plus simple et optimisée des traces d'outils. Leur relevé permet en effet d'étudier les méthodes et les techniques employées par les mineurs pour tailler la roche. Jusqu'à présent, la documentation de la morphologie et de la position des traces d'outils est réalisée soit par relevé à l'échelle 1 sur film transparent soit grâce à une prise de vue avec un éclairage rasant. Cependant, ces techniques présentent certaines limites. Compte tenu de l'éclairage limité, il peut être difficile de réaliser un relevé à l'échelle 1 complètement exhaustif. Par ailleurs, suivant la direction de l'éclairage rasant lors d'une prise de vue, certaines traces ne sont pas visibles, ce qui nécessite la multiplication des prises de vue avec la difficulté, dans ce cas également, de tendre vers l'exhaustivité. C'est pourquoi, il peut être difficile de multiplier les relevés dans une mine or c'est justement en étudiant un grand nombre de traces d'outils qu'il est possible de comprendre les techniques de creusement.

L'utilisation de l'outil photogrammétrique doit donc permettre de s'approcher de l'exhaustivité lors de l'enregistrement de l'information. En outre, sa simplicité de mise en œuvre sur le terrain favorise la multiplication des relevés donnant ainsi accès à une richesse plus importante d'information pour assurer une démonstration.

Le protocole photogrammétrique proposé permet de s'affranchir de toute interprétation difficile et de mise en place d'éclairage rasant sur le terrain puisque le traitement et l'analyse des données sont délocalisés au laboratoire. Sur le terrain, il est seulement nécessaire de réaliser une série de photos de la paroi étudiée selon le protocole décrit plus haut.



Figure 11 : Modèle photogrammétrique d'une paroi XVI^e siècle sans éclairage virtuel (GB06).

De retour au laboratoire, un modèle tridimensionnel est produit (Figure 11). Il peut alors être étudié pour mettre en évidence et relever les traces d'outils. L'inspection d'un modèle tridimensionnel grâce à un logiciel d'ingénierie permet notamment de faire varier la position d'une source d'éclairage virtuel pour choisir la position optimale pour la mise en évidence des microreliefs intéressants. On observe sur les figures suivantes que suivant la position de la source virtuelle, il est possible de faire ressortir les fractures géologiques (Figure 12) ou les traces d'outils (Figure 14).

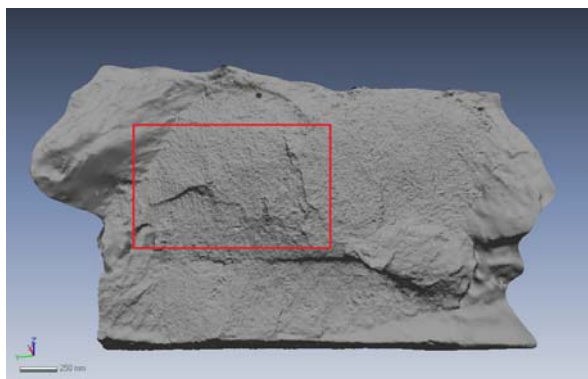


Figure 12 : Éclairage virtuel mettant en évidence les fractures géologiques (GB06).

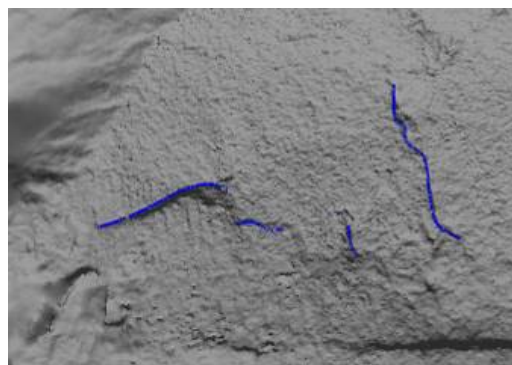


Figure 13 : Relevé virtuel des indices géologiques (GB06).

Le même logiciel permet également de relever individuellement chaque trace d'outils à l'aide d'un outil virtuel de dessin dans l'espace comme cela pourrait être fait sur le terrain (Figure 13 et Figure 15). Les conditions sont ici toutefois plus simples dans la mesure où l'on peut prendre du recul sur la paroi et faire varier l'éclairage très simplement. Enfin, il est aussi possible de faire le relevé en plusieurs fois en changeant régulièrement l'éclairage.

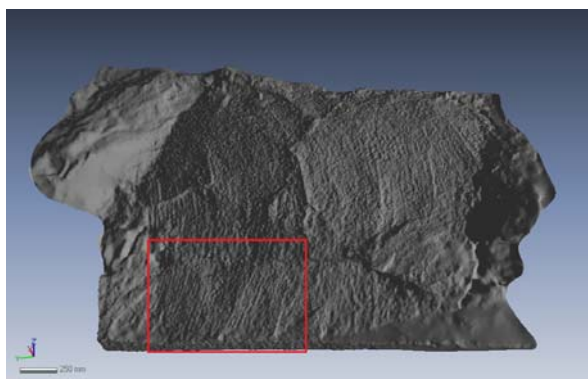


Figure 14 : Éclairage virtuel mettant en évidence les traces d'outils (GB06).

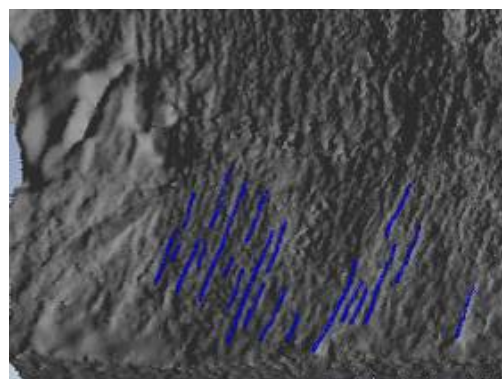


Figure 15 : Relevé virtuel des traces d'outils (GB06).

Compte tenu de la profondeur des traces d'outils, la résolution de notre modèle n'est peut-être pas assez grande pour mettre en évidence l'ensemble des stigmates. Afin, d'augmenter la précision de la représentation, il serait intéressant de réaliser de nouveaux tests. Si l'on considère que la précision d'un modèle tridimensionnel est proportionnelle au coefficient (B/H) avec B la distance entre deux prises de vue et H la distance au sujet¹⁷. La multiplication du nombre des prises de vue, de surcroît plus proche de la paroi, devrait permettre d'optimiser l'enregistrement des traces d'outils.

¹⁷ Kasser M., Egels Y., *Photogrammétrie numérique*, op. cit., p. 66.

Enfin, l'utilisation d'algorithmes de filtrage et de mise en relief habituellement utilisés pour traiter des données Lidar pourrait être également testée pour optimiser la mise en évidence des microreliefs d'une paroi sans avoir à faire varier l'éclairage.

3. Modélisation d'un espace de travail

La modélisation d'un espace au sein d'une mine peut également constituer la base pour réaliser une reconstitution d'une zone de travail. Grâce à l'outil informatique, un modèle tridimensionnel peut être utilisé comme une maquette dans laquelle il est possible d'ajouter des objets et aménagements virtuels.

Il s'agit ici de présenter une perspective de cette étude que nous avons seulement initiée lors de la campagne de Sainte-Marie. Nous avons en effet choisi de modéliser une tête de puits dans la mesure où existaient à l'origine au sein de cet espace des aménagements aujourd'hui disparus (plancher, treuil). La reconstitution de ces derniers en s'appuyant sur la maquette virtuelle à l'échelle pourra permettre de mieux comprendre l'organisation du travail dans cet espace.

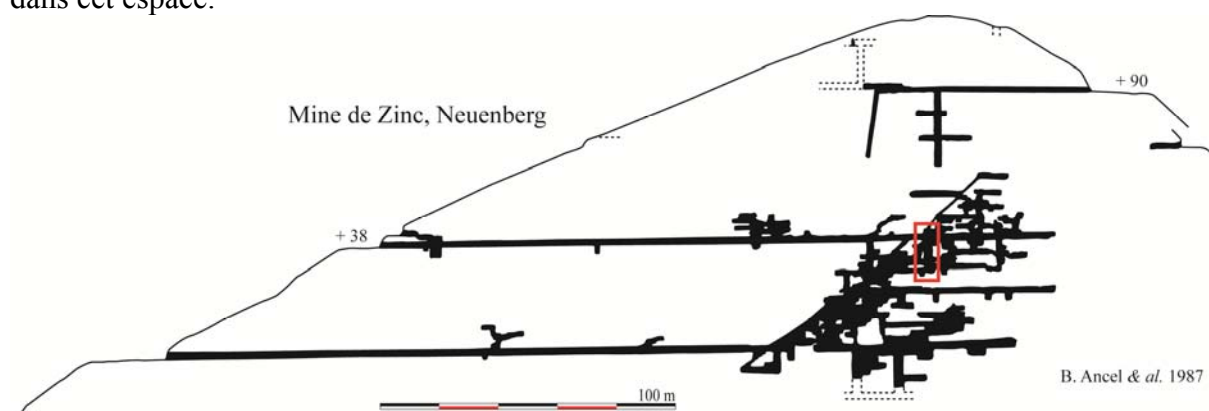


Figure 16 : Profil synthétique des travaux reconnus dans la mine de zinc avec localisation du puits étudié.

Nous avons donc sélectionné une tête de puits située dans le travers-banc du niveau 38 de la mine de zinc appartenant au Neuenberg (Figure 16). Celle-ci est particulièrement intéressante dans la mesure où elle présente plusieurs stigmates associés à d'anciens aménagements.

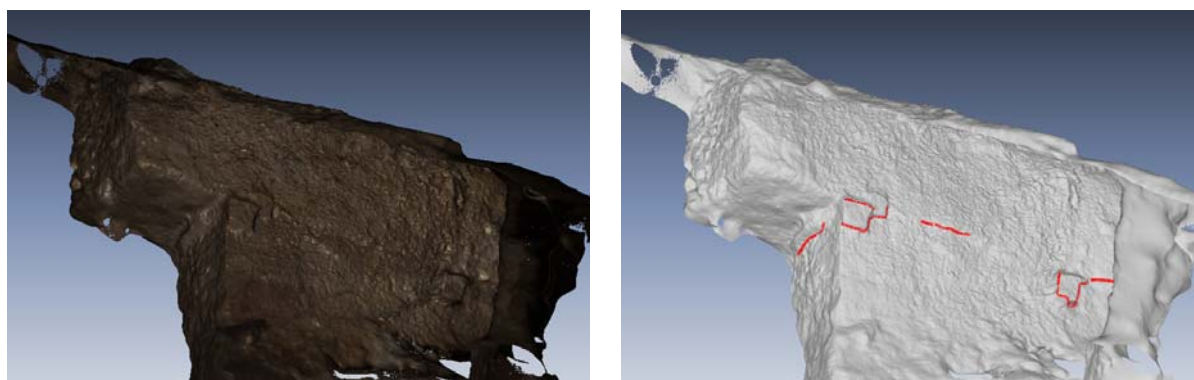


Figure 17 : Salle de la tête de puits coupée dans l'axe de la galerie originelle élargie avec éclairage virtuel mettant en évidence les encoches de poutres et le calage d'appui d'un plancher.

Le modèle tridimensionnel produit permet d'observer très distinctement les différentes structures associées à l'origine à l'organisation dans la salle de la tête du puits (Figure 17). Les imposantes encoches de poutres sont bien sûr facilement discernables, mais il est également possible de repérer les calages du plancher qui était posé sur les poutres.

La perspective de cette étude est de reconstituer virtuellement ces aménagements dont on dispose maintenant des points d'appuis. Il s'agit cependant de développement ultérieur de la méthode de relevé photogrammétrique qui est ici présentée.

4. Modélisation d'un puits

Aujourd'hui, le protocole usuel de relevé d'un puits de mine consiste en effet en réaliser des sections horizontales du puits à intervalle de profondeur régulier. C'est à partir de ces relevés qui peuvent être très nombreux suivant la précision recherchée qu'il est ensuite possible de reconstituer un puits en volume et élévation (par extrusion des sections).

L'une des perspectives de l'utilisation de la technique de relevé photogrammétrique en archéologie minière est de pouvoir obtenir le relevé d'un puits plus simplement et plus finement. En outre, est-il possible de disposer d'un photorelevé d'un tel aménagement, seulement à partir de photographies prises en tête de puits.

Dans un premier temps, nous avons sélectionné le puits de la mine Gabe Gottes (Figure 8 : GB23) pour réaliser une série de photographies prises seulement du point de vue de la tête du puits. Le modèle produit à l'aide des 16 images est présenté sur la figure 18 avec les positions respectives des prises de vue. Il met en évidence ici les limites de la méthode et principalement du matériel utilisé. En effet, la maquette virtuelle présente un grand nombre de trous résultants associés aux ombrages nécessairement existant lorsque l'on choisit volontairement de réaliser les photographies du seul point de vue de la tête de puits. Même si celui de la mine Gabe Gottes présente une bonne verticalité, sa largeur conjuguée à une accessibilité difficile en proche bordure a empêché le photographe d'enregistrer des images de l'intégralité de ses parois. En outre, la puissance limitée du flash n'a pas permis de disposer de bonnes images de la partie basse du puits.



Figure 18 : Vue d'élévation du modèle du puits de la mine Gabe Gottes (GB23).



Figure 19 : Prise de vues en descendant dans le puits de la mine de zinc (MZ03a).

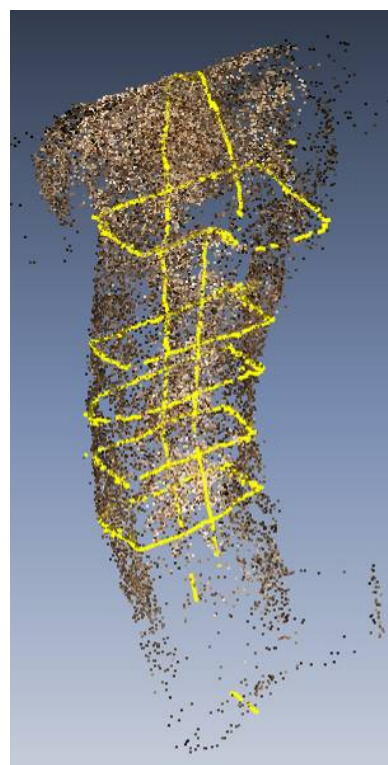


Figure 20 : Nuage de points du puits de la mine de Zinc (MZ01, 03a et 03b).

Fort de ce premier constat nous avons réalisé une nouvelle expérience dans le puits de la mine de zinc présenté plus haut (Figure 16). L'objet est de vérifier s'il est possible d'en faire le photorelevé à partir d'une descente progressive sur corde en photographiant les parois (Figure 19). Ce puits n'est pas totalement vertical et change d'axe directeur au milieu de sa hauteur. C'est pourquoi il présente un intérêt pour définir une telle expérience.

D'un point de vue pratique, le puits a été photographié en deux moitiés au cours de deux descentes successives. Le photographe est assuré par un spéléologue¹⁸ et n'a pas à gérer les opérations de descente (Figure 19).

À partir, des photos enregistrées, il a été possible de produire un nuage de points de toute la hauteur du puits ainsi que sa tête. Un tel modèle peut alors être étudié pour extraire des profils verticaux ainsi que des sections horizontales (Figure 20).

5. Modélisation espace complexe

À partir de l'expérience acquise au cours de notre première campagne d'essais nous avons voulu préciser les limites de l'application de la technique photogrammétrique en archéologie minière en essayant de modéliser une zone particulièrement complexe. Nous avons donc essayé de relever un espace particulier correspondant à la jonction de la mine St Michel-Eisenthür et la mine du Chêne au niveau d'un filon. En 1560, cette zone fut au cœur d'un conflit entre les deux mines qui entraîna la réalisation d'un plan (Figure 21)¹⁹.

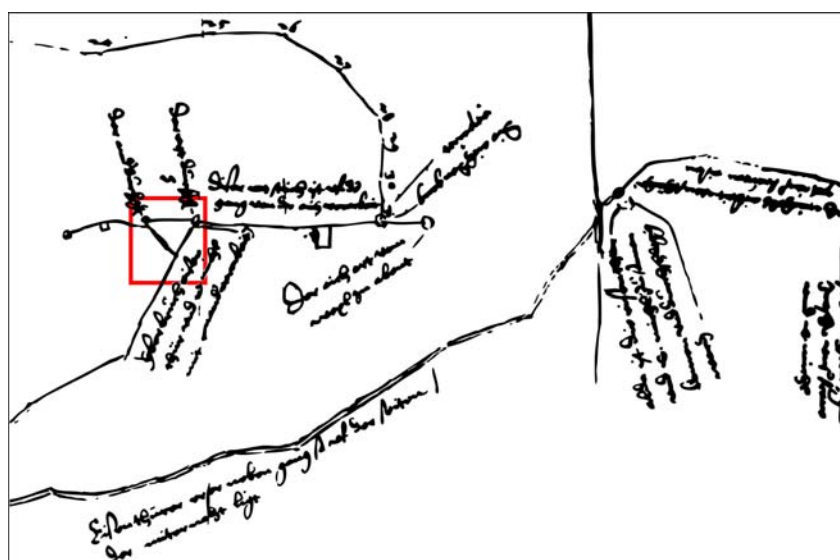


Figure 21 : Plan de 1560 de la zone de conflit entre la mine St Michel-Eisenthür et du Chêne.

La zone se développe en une galerie de la mine St Michel qui se dédouble pour arriver au niveau d'un chantier vertical de la mine du Chêne. C'est également à travers une chatière que se réalise la jonction entre les deux mines en conflit.

Pour réaliser une modélisation de cet espace complexe, nous avons réalisé une série de 559 photos sur une durée de 1 heure 26 minutes. Seule l'application photosynth a permis de traiter cette importante collection d'images. Nous avons obtenu un ensemble de 376303 points (Figure 22).

¹⁸ Les auteurs tiennent à remercier Michel Kammenthaler du Spéleo Secours Français Alsace pour sa disponibilité et son encadrement spéléologique.

¹⁹ Ancel B., Fluck P., *Une exploitation minière du XVIe s. dans les Vosges Le filon Saint-Louis du Neuenberg (Haut-Rhin) ; caractères et évolution*, coll. « Documents d'archéologie française », t. 16, 1988, 124 p.

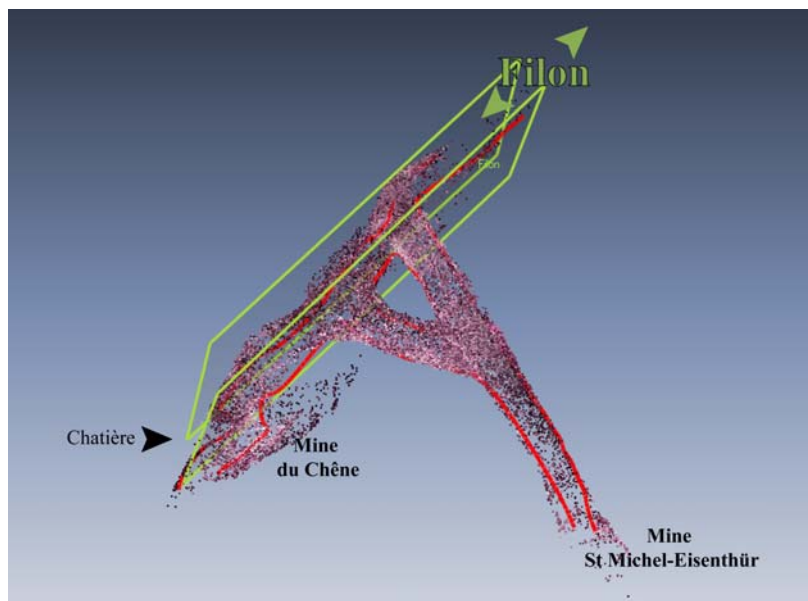


Figure 22 : Modèle photogrammétrique de la zone de conflit des mines St Michel-Eisenthür et du Chêne.

À partir de ce modèle tridimensionnel, il est possible d'extraire un plan de la zone qui comparable à celui établi en 1560. En outre, les parois du filon permettent de reconstituer la place que prenait ce dernier avant d'être exploité par les mineurs.

6. Un essai de visite virtuelle

Dans la mesure où notre technique photogrammétrique produit un modèle tridimensionnel présentant une texture photoréaliste, il est possible de le traiter et de la mettre en valeur grâce à l'utilisation d'un logiciel d'animation 3D afin de produire une visite virtuelle. Ce travail a pu être réalisé à partir de nos essais dans la mine Gabe Gottes (GB18) par Birgit Borchert du Deutsche Bergbau-Museum de Bochum.

Figure 23 : Animation produite à partir d'un modèle photogrammétrique (utiliser le bouton ► pour la visualiser).

Elle présente une visite à l'intérieur de deux galeries de mine ainsi qu'un point de vu depuis la roche qui permet d'appréhender le développement des galeries dans l'espace.

7. Essai prospectif de modélisation d'une fouille de surface

Dans la mesure où notre campagne d'essais photogrammétrique est intervenue dans le cadre du PCR « Altenberg : fonderies et mines d'argent, X^e-XVII^e siècles » au cours duquel plusieurs chantiers de fouilles étaient organisés, nous avons eu l'opportunité d'appliquer notre protocole sur un chantier de surface. Notre expérience a été réalisée sur un sondage en cours d'étude sur le site Bas Patris 02.



Figure 24 : Relevé photogrammétrique d'une fouille de surface.

À partir de 42 photographies de l'emprise de la fouille, il a donc été possible d'obtenir un modèle numérique de terrain sur lequel est projetée une texture photoréaliste (Figure 25). Il est donc possible d'obtenir une orthophotographie virtuelle du site dans la mesure où toutes les photos ont été prises de biais à auteur d'homme (Figure 24).

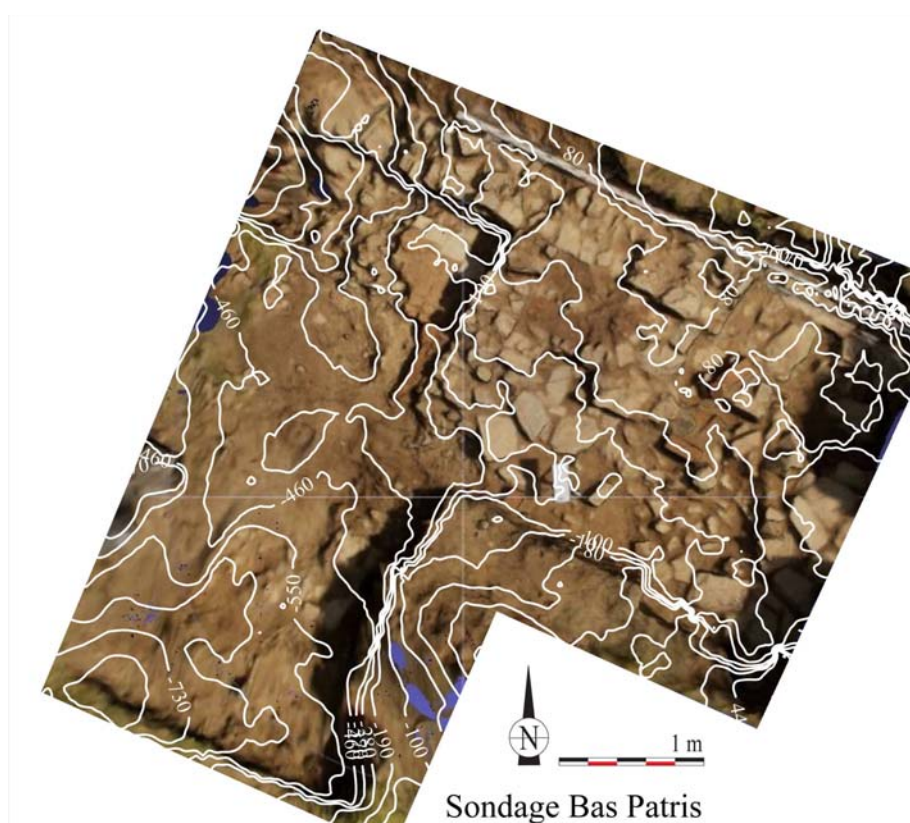


Figure 25 : Modèle numérique de terrain du sondage Bas Patris obtenu par photogrammétrie.

IV. Essais réalisés à Melle (79) : l'étude de l'abatage par le feu

Les expériences menées à Melle doivent permettre de vérifier si notre protocole de relevé photogrammétrique peut constituer un nouvel outil pour l'étude de la technique minière d'abatage par le feu. En réalisant des modélisations successives d'un chantier minier expérimental en cours de creusement par le feu, il serait alors possible de mieux comprendre la technique de l'abatage par le feu

1. Abatage par le feu expérimental

Les expérimentations ont été réalisées sur la plateforme d'expérimentation paléométallurgique des Mines d'argent des Rois Francs à Melle où un espace est dédié à l'étude de la technique minière de creusement par abatage par le feu.

Au cours de l'expérience, deux feux d'abatage ont été réalisés (Figure 26). Avant chaque feu, le chantier expérimental est photographié sous différents angles afin de pouvoir être modélisé par photogrammétrie. Pour pouvoir superposer et comparer les différents modèles successifs, 8 points de référence fixes ont été installés à la périphérie du chantier. Après chaque feu la roche abattue est recueillie afin de mesurer le volume extrait lors de chacun des abatages.



Figure 26 : Chantier expérimental d'abatage par le feu.

Dans un premier temps, les charbons mélangés aux roches abattues sont éliminés par flottaison. Ce n'est qu'après ce tri qu'il est possible d'estimer le volume de roche extrait. Pour le mesurer, un seau de volume V est rempli d'un volume roche (V_{roche}) puis un volume d'eau (V_{eau}) est ajouté jusqu'à remplir entièrement le seau. Le volume exact de roche se déduit donc par la relation : $V_{\text{roche}} = V - V_{\text{eau}}$.

Ce protocole est relativement lourd et contraignant à mettre en œuvre dans le cadre de nombreuses expérimentations d'abatage par le feu. Il est ici mis en œuvre afin de pouvoir proposer une nouvelle méthode plus rapide pour la documentation de ce type d'expériences. Celle-ci devant être préalablement validée par une comparaison avec des références connues.

2. Matériel de prise de vue

Les photographies ont été réalisées avec un appareil photo à visée reflex Nikon D90 équipé d'un objectif Nikon 18-105 mm f/3.5-5.6. La focale la plus courte a été utilisée afin de minimiser le nombre de prises de vue. Enfin, même si les prises de vue ont toutes été réalisées avec un éclairage naturel suffisant, le flash de l'appareil photo a tout de même été systématiquement utilisé afin de limiter au maximum les ombres pouvant perturber la modélisation photogrammétrique.

3. Résultats

A la suite de nos essais, 5 modèles tridimensionnels du chantier expérimental d'abatage par le feu ont été calculés²⁰. Le nombre de photos enregistrées ainsi que la durée de la séquence de prise de vue est présenté dans le tableau en annexe (Annexe : inventaire des essais photogrammétriques). Il met en évidence que le nombre de photos n'est pas fixe. Une quarantaine de prises de vue semble suffire pour produire un modèle tridimensionnel, mais il n'est pas pénalisant d'utiliser plus de photographies.

On soulignera que la durée d'enregistrement est très rapide. Il est possible d'obtenir un modèle tridimensionnel complet d'un petit chantier d'abatage par le feu à partir de 5 minutes de prise de vue seulement (Figure 28). Le traitement informatique est ensuite réalisé de retour au laboratoire.



Figure 27 : Chantier expérimental après le deuxième feu.

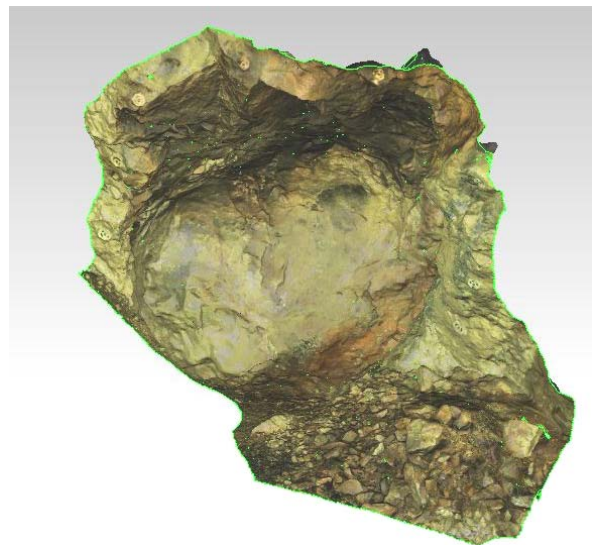


Figure 28 : Modèle tridimensionnel produit (ME05).

Après avoir produit les trois modèles tridimensionnels correspondant à l'état initial et aux résultats des deux abatages successifs, ils sont recalés deux à deux en faisant correspondre les huit points de référence (ME01-ME03 et ME03-ME05). Les modèles sont comparés grâce au logiciel 3Dresaper. Utilisé habituellement pour confronter la morphologie d'une pièce mécanique produite à celle de son ébauche de référence, cet outil a été ici utilisé pour comparer l'état du chantier avant et après un abatage. Les niveaux de variations sont alors décrits par un dégradé de couleur (Figure 29).

²⁰ Deux de ces modèles (ME02 et ME04) réalisés juste après l'abatage et avant que le chantier n'ait été purgé de la roche extraite ne seront pas étudiés ici.

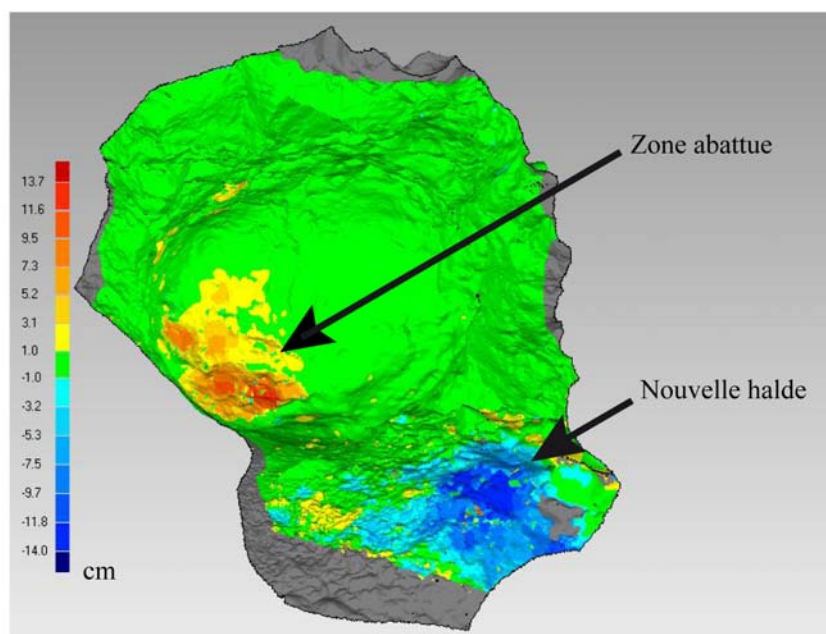


Figure 29 : Comparaison du modèle ME05 avec ME03.

La figure 29 permet alors d'observer les zones qui ont été abattues au cours du deuxième feu²¹. Les buches ont été placées sur le côté gauche du chantier et c'est effectivement dans cet espace que selon notre comparaison que la roche détachée. Il est également possible de constater que le creusement est orienté principalement vers le bas. Finalement, les flammes qui ont léché le toit du chantier pendant l'abatage semblent avoir eu un effet limité. Enfin, la roche stérile abattue ayant été placée sur une petite halde à côté du foyer est également visible sur la représentation compte tenu de l'ajout de matière.

La seule comparaison des modèles après chaque abatage permet donc déjà de disposer d'informations inédites et très facilement accessibles avec notre méthode photogrammétrique. Mais qu'en est-il de la précision de ce nouveau protocole de relevé. Si la bibliographie nous indique que la qualité des mesures peut être équivalente à celle qu'il est possible d'obtenir avec un lasergrammètre²², il était cependant nécessaire de le vérifier pour notre application de la photogrammétrique en archéologie minière suivant le protocole qui a été défini.

L'utilisation d'un lasergrammètre pour modéliser le chantier expérimental pour ensuite le confronter aux données de photogrammétrique est un protocole que nous n'excluons pas de mettre en œuvre lors de futures expérimentations cependant nous avons ici retenu un plan d'expérience parallèle. En effet, disposant des volumes de roche mesurés sur le terrain, il est possible de confronter ces données aux mesures réalisées à partir des modèles tridimensionnels. C'est d'ailleurs pour estimer les quantités de roche extraite résultant d'un abatage que le protocole photogrammétrique a été mis au point. Il est donc d'autant plus intéressant de vérifier la qualité du calcul de cette donnée.

C'est encore grâce à un outil du logiciel 3Dresaper qu'il est possible d'estimer la différence de volume entre deux modèles correspondant à la roche extraite lors d'un abatage. Ce calcul est réalisé pour les deux expériences pour évaluer le volume de différence entre ME01 et ME03, puis entre ME03 et ME05. Afin de sélectionner pour le calcul uniquement les

²¹ Les écarts inférieurs à plus ou moins millimètre entre les deux modèles correspondants principalement aux variations dues à la précision de la méthode ne sont pas représentés. Ils sont rassemblés sous la couleur verte.

²²Vautier F., Voldoire O., « Comparaison lasergrammétrique/photogrammétrique pour la mesure de l'érosion de pierres de façade - Abbaye de Manglieu, Puy-de-Dôme », dans Jaillet S., Ployon E., Villemin T., eds., *Images et Modèles 3D en Milieux naturels*, Le Bourget-du-Lac, Collections Edytem, 2011, t. 12, p. 199-205.

zones du chantier ayant été creusées (et non les zones de halde), il est indispensable de s'appuyer sur la comparaison des deux modèles précédemment présentée (Figure 29).

Les résultats des mesures sur le terrain confrontés aux données calculées à partir des modèles tridimensionnels sont présentés dans le tableau suivant :

Expérience	Mesuré terrain (litres)	Mesuré 3D (litres)	Écart (%)
ME01-ME03	11,26	11,23	0,27
ME03-ME05	19,10	18,92	0,94

A partir de données obtenues pour chacune des deux expériences, il est possible de conclure à une très bonne précision des résultats obtenus pour l'estimation des volumes de roche abattue. Les différences entre les volumes réels et ceux calculés à partir des modèles photogrammétriques sont inférieures au pourcent ce qui est une limite tout à fait admissible vis-à-vis de la précision nécessaire aux archéologues miniers pour la compréhension des techniques d'abatage par le feu.

En conclusion, notre protocole photogrammétrique peut à présent être proposé comme un nouvel outil pour l'étude des mines et notamment de la technique d'exploitation d'abatage par le feu. Les différentes expériences mises en œuvre sur la plateforme de Melle permettent de conclure à l'efficacité de notre protocole en termes de simplicité de mise en œuvre, mais également de précision. Son utilisation à l'avenir dans le cadre d'étude sur les techniques d'exploitation minière devrait permettre d'avoir accès à de nouvelles données plus précises et plus riches.

V. Conclusion

Au terme de nos expériences, la méthode de relevé photogrammétrique proposée apparaît comme un nouvel outil performant pour l'étude des mines anciennes. Il s'agit d'un moyen d'étude complémentaire des protocoles aujourd'hui utilisés par les archéologues miniers et n'a pas vocation à les remplacer. Elle donne accès à des informations supplémentaires qui étaient pour certaines trop fastidieuses à collecter (relevés de traces d'outils en très grand nombre, multiplication des sections et profil dans un puits ou une galerie, chantier d'abatage par le feu expérimental).

Les multiples essais réalisés ont montré la viabilité de notre méthode au sein d'espaces très réduits comme plus larges. Et même s'il est envisagé d'améliorer le système de mire spatiale pour disposer d'une référence de longueur à l'échelle de la scène modélisée, la précision des relevés s'avère tout à fait comparable à celle de relevés traditionnels en plan.

Avec un investissement matériel de l'ordre de 3000 euros, nous proposons donc un moyen de relevé assez léger pour être systématiquement transporté dans un kit spéléologique au cours d'une exploration. Si l'archéologue minier estime qu'il ne pourra plus revenir dans une zone compte tenu de sa dangerosité, il pourra tout de même enregistrer beaucoup d'informations qu'il pourra étudier *a posteriori*. En outre, il produira des données sensiblement équivalentes à celle d'un lasergrammètre (50000 euros) dont l'emploi est de toute façon trop contraignant au sein d'une mine archéologique.

Annexe : inventaire des essais photogrammétriques

Mine	Ref	Nbr photos	Temps de prise (min)	Vitesse Ph/min	Objectif	123D Catch	Photosynth	Remarques
Gabe Gottes	GB01	75	15	5.0	Traces d'outils	Échec	Pas testé	Profondeur de champ trop faible
Gabe Gottes	GB02	46	8	5.8	Traces d'outils	Imparfait	Pas testé	Profondeur de champ trop faible
Gabe Gottes	GB03	138	24	5.8	Galerie exigüe	Échec	Pas testé	Profondeur de champ trop faible
Gabe Gottes	GB04	40	9	4.4	Galerie exigüe	Ok	Pas testé	
Gabe Gottes	GB05	417	93	4.5	Boucle	Échec	Pas testé	Profondeur de champ trop faible
Gabe Gottes	GB06	55	9	6.1	Traces d'outils	Ok	Pas testé	
Gabe Gottes	GB07	7	1	7.0	Traces d'outils	Non traité	Pas testé	
Gabe Gottes	GB08	27	2	13.5	Traces d'outils	Ok	Pas testé	
Gabe Gottes	GB09	4	0.5	8.0	Traces d'outils	Non traité	Pas testé	
Gabe Gottes	GB10	6	1	6.0	Traces d'outils	Non traité	Pas testé	
Gabe Gottes	GB11	30	3	10.0	Traces d'outils	Échec	Pas testé	Prise de vue compact
Gabe Gottes	GB12	23	3	7.7	Front de taille	Ok	Pas testé	
Gabe Gottes	GB13	25	4	6.3	Front de taille	Non traité	Pas testé	
Gabe Gottes	GB14	35	5	7.0	Galerie angulaire	Échec	Ok	Compact
Gabe Gottes	GB15	26	4	6.5	Front de taille	Moyen	Pas testé	Compact
Gabe Gottes	GB16	48	5	9.6	Galerie angulaire	Ok	Ok	
Gabe Gottes	GB17	28	4	7.0	Galerie angulaire	Ok		
Gabe Gottes	GB18	207	42	4.9	Galerie exigüe	Ok		
Gabe Gottes	GB19	23	3	7.7	Galerie exigüe	Ok		
Gabe Gottes	GB20	27	5	5.4	Plafond galerie	Ok		
Gabe Gottes	GB21	31	3	10.3	Front de taille	Ok		
Gabe Gottes	GB22	65	13	5.0	Galerie attaque au feu	Ok		
Gabe Gottes	GB23	16	6	2.7	Puits par-dessus	Ok		
Gabe Gottes	GB24	123	39	3.2	Chantier vertical par en dessous	Échec		Limite logicielle
Gabe Gottes	GB25	19	8	2.4	=GB19	Ok		HD
Gabe Gottes	GB26	107	25	4.28	Réseau de galeries	Échec		Manque de photos
Gabe Gottes	GB27	72	10	7.2	Galerie	Moyen		Gouttes sur objectif
Saint-Louis	SL01	559	86	6.5	Système complexe	Échec	Ok	Système trop complexe
Saint-Louis	SL02	185	23	8.0	Galerie longue	Échec		Manque de photos
Mine de zinc	MZ01	171	47	3.6	Tête de puits	Ok		

Mine	Ref	Nbr photos	Temps de prise (min)	Vitesse Ph/min	Objectif	123D Catch	Photosynth	Remarques
Mine de zinc	MZ02	13	15	0.9	Puits par-dessus	Échec	Ok	
Mine de zinc	MZ03a	76	21	3.6	Descente dans puits	Échec	Ok	
Mine de zinc	MZ03b	80	18	4.4	Descente dans puits	Échec	Ok	
Bas Patris	BP01	41	12	3.4	Archéologie de surface	Ok		
Melle	ME01	47	5	9.4	Abatage XP	OK		
Melle	ME02	40	6	6.7	Abatage XP	Ok		Non exploité
Melle	ME03	39	5	9.8	Abatage XP	Ok		
Melle	ME04	45	4	11.3	Abatage XP	Ok		Non exploité
Melle	ME05	49	5	9.8	Abatage XP	Ok		

