

Lasergrammétrie terrestre et Géomécanique en carrières, travaux au rocher et travaux souterrains

Apparue sur le marché au milieu des années 90, la lasergrammétrie terrestre (ou laser scanner terrestre) offre des avantages incontestables pour la résolution de quelques uns des principaux problèmes qui se posent en matière de terrassements rocheux, en surface comme en profondeur. Au-delà des tâches topographiques fondamentales, elle permet l'application de méthodes géomécaniques innovantes en matière de conception de déblais, d'optimisation d'abattage et de sécurité.

Topographie et géotechnique traditionnelles en terrassement rocheux

Le rôle du topographe a toujours été essentiel dans tous les travaux de génie civil, mines et carrières. C'est lui qui relève l'état géométrique des lieux et son évolution. Il calcule les cubatures et mesure d'éventuelles déformations. Il fournit aux partenaires du projet, et notamment au géotechnicien les plans et coupes sur lesquels celui-ci aura à se pro-

noncer pour optimiser un mode d'extraction ou assurer une sécurité à court comme à long terme.

Mais il le fait, le plus souvent, à partir d'un nombre limité de points de mesure à partir desquels il établit coupes et plans. Dans le cas de fronts rocheux de morphologie complexe, le nombre de points relevés est en général très limité. Le géotechnicien, de son côté, a besoin d'une perception tridimensionnelle du site qu'il doit étudier. Même si la plupart des logiciels de mécanique des sols et des roches tournent aujourd'hui en mode 2D, tous les praticiens connaissent une véritable frustration au moment de simplifier abusivement leur vision du massif à étudier pour se contenter du 2D. Au delà de cette simple frustration, ils savent aussi que des résultats 2D conduisent souvent à majorer les coefficients de sécurité et à dépenser inutilement des sommes très importantes.

On va montrer ci-dessous à travers trois exemples comment, au prix d'une bonne coordination entre topographes et géotechniciens et d'efforts partagés de programmation, on voit apparaître aujourd'hui des méthodes extrêmement performantes d'optimisation des travaux au rocher.

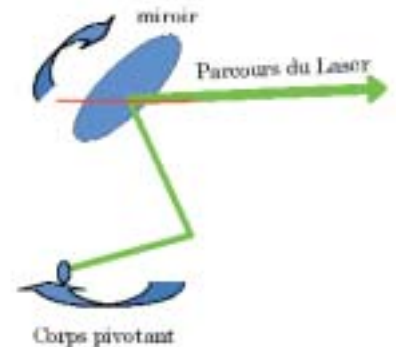


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un laser-scanner

Rappel des principes de base de la lasergrammétrie

Le principe de fonctionnement est basé sur l'émission d'un rayonnement laser dévié par des miroirs. En contrôlant la rotation du corps de l'appareil et du miroir vertical suivant des incréments très faibles, on balaie l'espace étudié de millions de pulses laser d'espacement angulaire régulier pour obtenir le positionnement spatial d'autant de points.

La densité de ce nuage de points dépend de la finalité du relevé (l'auscultation de fronts de taille demandera une densité de points plus importante que le calcul de cubatures par exemple).



Figure 2 : Illustration de la mise en œuvre en carrière

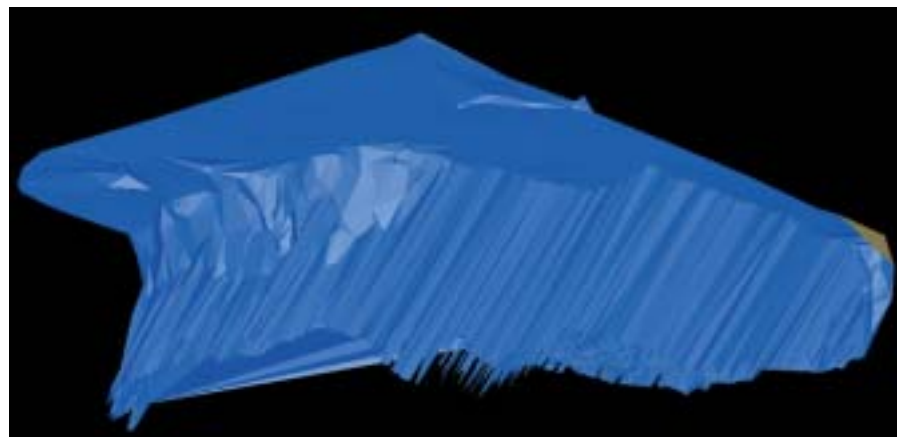


Figure 3 : Modèle généré par un algorithme de Delaunay/Voronoi

L'opération est répétée depuis plusieurs points de vue. Les résultats sont alors regroupés les uns par rapport aux autres et calés dans le système de coordonnées en place sur le site (généralement le système Lambert et l'altitude NGF).

Par rapport aux techniques de relevé classique (théodolite, station totale ou photogrammétrie), la technologie laser scanner présente de véritables innovations:

- cadence de relevé entre 1000 pts et 500 000 pts / seconde, suivant les modèles,
- portée qui peut dépasser le kilomètre,
- précision comprise entre 5 mm et 10 cm, dépendant du type d'appareil et de la distance de mesure,
- mesures sans contact avec l'objet mesuré (sécurité des opérateurs),
- zones morphologiquement complexes relevées avec autant de définition et de précision que les zones simples,
- le type de roche n'influence pas la précision.

L'obtention de surfaces maillées

La première étape, incontournable, est donc de créer un ensemble de maillages triangulaires qui vont se substituer aux points pour former un modèle en facettes de la surface scannée. Ce travail de maillage est d'une importance primordiale pour toutes les applications qui vont être explicitées plus loin.

Les algorithmes utilisés ici sont beaucoup plus poussés que l'algorithme de Delaunay / Voronoï qui est employé dans la majorité des logiciels de maillage. L'algorithme de Delaunay / Voronoï permet de mailler en 2,5 D : à chaque position X, Y correspond une position Z unique. Les surfaces les plus verticales sont les moins bien traitées, quant aux surplombs, blocs rocheux ou cavités ils ne peuvent purement et simplement pas être maillés avec ce type de calculs sans commettre des erreurs. Il faudrait décomposer le nuage de points en plusieurs sous-nuages, et recréer un axe des Z local à chaque sous-nuage pour lequel il n'y a pas de surplomb. Ceci reste un travail fastidieux, où ni l'homogénéité finale du modèle, ni son exactitude par rapport à l'objet sont garanties. Le modèle représenté sur la figure 3 a été généré par un algorithme de Delaunay / Voronoï.

Les pics proviennent du fait que l'algorithme détermine la surface en ne tenant compte que de X et Y et mélange le toit et le mur sans se soucier de la co-

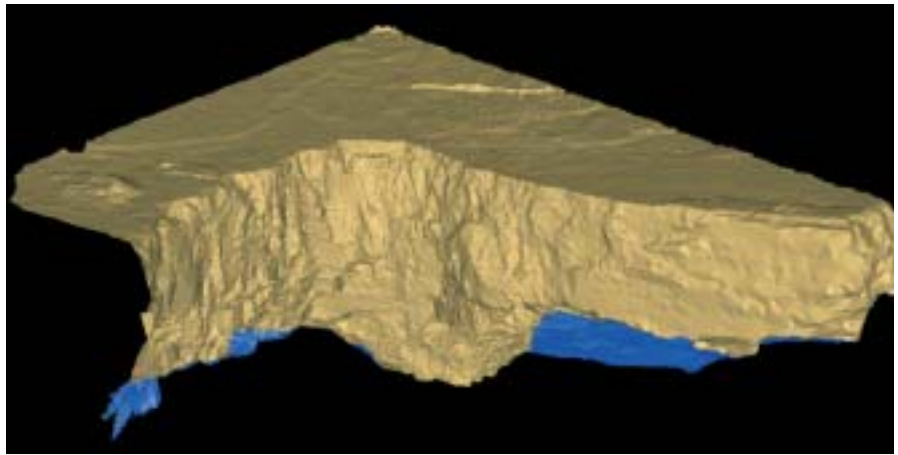


Figure 4 : Modèle généré par 3D-Reshaper

hérence du résultat. Lorsque la bonne hauteur Z est affectée, des pointes apparaissent aux endroits où on a relié par erreur le toit et le mur.

La voie privilégiée dans la méthode est le maillage direct en 3D. Le résultat est un modèle intègre (Figure 4).

Pour arriver à un maillage de qualité (exempt de trous, fidèle à l'objet et avec une géométrie optimisée), plusieurs opérations sont nécessaires.

L'optimisation de la géométrie du maillage

Elle regroupe aussi bien les étapes d'élimination des triangles aberrants (végétation, points parasites...), le raffinement du maillage afin de satisfaire un critère d'erreur de corde: là où la roche est relativement plane, le nombre de triangles est faible, alors que les zones plus accidentées sont décrites par un maillage bien plus dense. Cette différence de densité de triangles est l'un des facteurs clef de la maniabilité ultérieure du modèle complet (taille du fichier informatique réduite). On termine par le lissage du maillage ainsi que la réorganisation des triangles en fonction de la géométrie générale. Les triangles sont ré-orientés dans le sens des courbures, des arêtes, etc, ainsi le modèle s'adapte au mieux à la réalité de l'objet. Le modèle obtenu est plus fiable et précis, sans pour autant augmenter le nombre de triangles et donc la taille du fichier résultant.

Le contrôle qualité

Le modèle créé est ensuite comparé au nuage de points pour un calcul des déviations. La distance entre chaque facette du modèle et le(s) point(s) le(s) plus proche(s) est codée sur une échelle de couleur. Dans l'exemple présenté figure 5, 98,2 % des facettes du modèle

sont à moins de 2,5 cm du nuage de points (dont la précision est de l'ordre de 4 mm sur chaque point): on peut donc facilement se rendre compte des zones à retravailler, si elles sortent des tolérances fixées.

Cette étape, appelée aussi « inspection » peut aussi être utilisée pour comparer deux modèles à des instants différents afin de connaître le mouvement du terrain, la progression d'un front de taille, le volume extrait, etc.

Le caractère systématique du relevé écarte d'emblée les erreurs d'interprétation des mesures telles qu'elles peuvent survenir avec l'emploi de méthodes topographiques classiques.

Des perspectives nouvelles en mécanique des roches

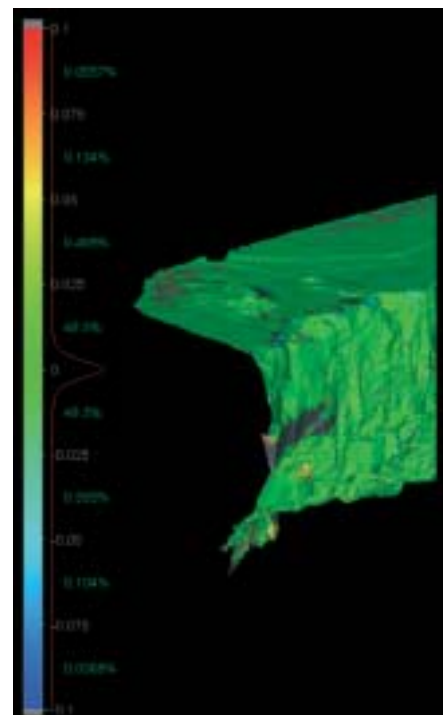


Figure 5 : Contrôle qualité : écarts entre maillage et nuage de points

Les faiblesses des approches traditionnelles

Les méthodes traditionnelles d'étude des massifs rocheux n'ont guère évolué depuis fort longtemps. Le praticien est toujours confronté à un quadruple problème :

- les vues éloignées ne permettent pas d'apprécier les éléments dimensionnels et d'observation indispensables à la bonne analyse des faits,
- les approches en techniques alpines sont dangereuses. Si elles permettent d'aller au contact du problème, leurs conditions d'exécution empêchent le

recul nécessaire pour une appréciation d'ensemble,

- les levés topographiques se résument le plus souvent à quelques points en haut et en bas des profils étudiés,
- les méthodes photogrammétriques traditionnelles, fort chères, traitées par des spécialistes, donnent certes une bonne estimation des formes et reliefs, mais ne rendent pas compte des singularités géologiques et structurales des massifs traités.

Pourtant, le géomécanicien a besoin de déceler et d'interpréter des éléments linéaires et surfaciques dont il sait discerner la trace sur le terrain. Mais les coupes et plans 2D traditionnels ne lui per-

mettent pas de maîtriser l'agencement spatial de ces éléments dans son travail de compréhension et de calcul de l'équilibre. Il a besoin, pour cela, de constituer un modèle, ou une maquette 3D.

L'apport des modèles 3D

Pour apporter des solutions modernes à ces problèmes complexes, on a développé, à partir des données obtenues par lasergrammétrie, une chaîne d'outils de traitement, qui permettent d'intégrer les démarches naturalistes et mécanistes de l'appréciation de l'équilibre d'une paroi rocheuse.

Les levés lasergramétriques décrits dans la partie précédente conduisent à la construction d'un modèle numérique en facettes qui permet d'apprécier finement le modelé du massif et de discerner les éléments morphologiques (discontinuités, sous cavages, vires), et même et surtout de les observer sous plusieurs angles pour mieux appréhender leur agencement spatial (Figure 6). Mais il manque encore, à ce stade, la vision réaliste que l'on obtient en drapant sur le modèle des éléments photographiques moyennant des prétraitements complexes des prises de vues. On obtient ainsi le photo-modèle. Il ne s'agit pas là des photo-modèles couramment utilisés en imagerie de synthèse grand public, mais de modèles exigeant un traitement beaucoup plus complexe et qui permettent de repérer dans l'espace tous les éléments pertinents (Figure 7).

Pour ce faire, les photographies doivent être orientées dans l'espace. Il a fallu créer un outil d'orientation des photos qui, tenant compte des paramètres de calibration de l'appareil photo, recalculait sa position au moment de la prise de vue pour augmenter la précision du calcul d'orientation.

Une fois ce traitement réalisé, il est possible d'affecter à chaque facette l'élément de photographie orientée correspondant.

On peut alors tourner autour de la cible pour l'observer sous tous les angles, ce qui est précieux pour comprendre le problème posé (ici, d'instabilité) (Figure 8).

L'analyse structurale

Le système calcule ensuite l'azimut et le pendage de toutes les facettes du modèle. Il faut alors opérer des tris et regroupements pour faire émerger les principales directions structurales. Cela se fait en utilisant les ressources d'algorithmes statistiques. Un calcul de proximité permet de regrouper toutes les facettes voisines



Figure 6 : Traitement en facettes



Figure 7 : Photomodèle



Figure 8 : Changement d'angle d'observation



Figure 9 : Identification des directions structurales

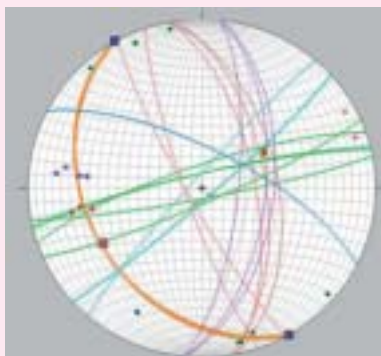


Figure 10 : Une expression plus traditionnelle des résultats

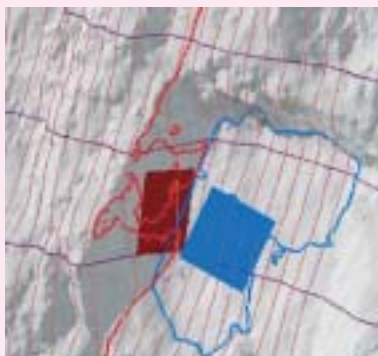


Figure 11 : Intersections de deux discontinuités majeures avec le massif

Nombre de plans	13
Surface m ²	69,71
Distance moyenne m	0,24
Ecart type m	0,45

dont l'orientation ne diffère que très peu (seuil paramétrable), et de les remplacer par une facette unique dont la surface est calculée, ce qui va permettre de pondérer son importance dans des traitements ultérieurs (Figure 9).

On représente alors les groupes de facettes les plus importants par des rectangles de surface proportionnelle à leur importance sur le modèle, ce qui permet de mieux comprendre la structure. En sélectionnant à l'écran un de ces rectangles, on affiche les coordonnées de son centre, son numéro de référence, son azimut et son pendage. C'est une version moderne du travail à la boussole, mais qui permet de couvrir l'ensemble du massif et surtout de positionner en 3D les éléments mesurés. Pour ceux qui

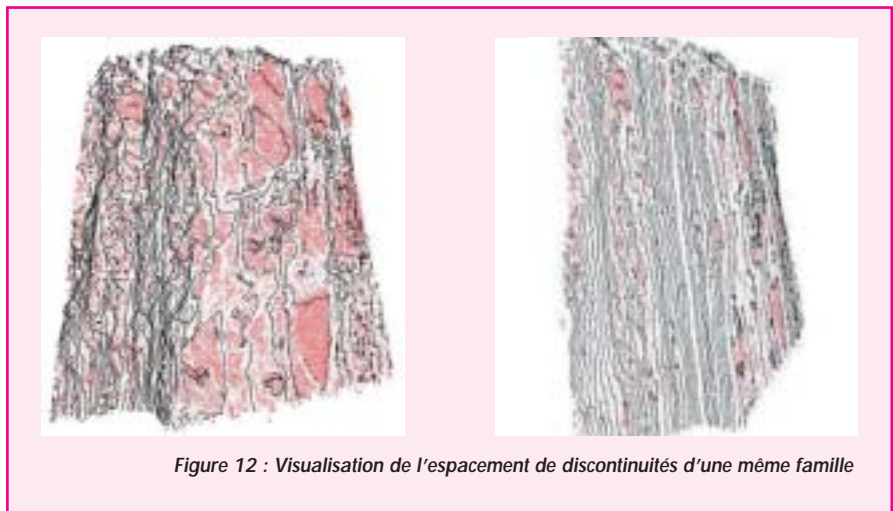


Figure 12 : Visualisation de l'espace de discontinuités d'une même famille

préfèrent revenir aux modes de représentation traditionnels, le système génère en parallèle les diagrammes stéréographiques classiques (Figure 10). Une fois sélectionnées les directions structurales les plus importantes, on peut calculer et dessiner leurs intersections avec le massif pour déterminer les polyèdres qu'elles découpent (Figure 11). Mais on peut aussi calculer l'espace entre les discontinuités d'une même famille et la variation spatiale de

cet espacement. Ce sont là deux éléments de jugement extrêmement importants pour tous les concepteurs de travaux au rocher (abattage en carrière, terrassements, fondations d'ouvrages) (Figure 12).

L'équilibre des talus et l'optimisation des abattages

Ce découpage en polyèdres permet d'aborder le problème de la stabilité avec des méthodes extrêmement puissantes utilisant notamment les algorithmes de la théorie des blocs (Figure 13 et 14).

Les figures 14 a et b illustrent l'application de la démarche à la mise en sécurité d'un front rocheux d'une trentaine de mètres de hauteur. Le plan jaune est celui d'une direction structurale déterminante (celle illustrée sur la figure 12). Le volume du compartiment instable purgé a été calculé par le système (figure 15).

Celui-ci permet par ailleurs de fournir aux spécialistes en explosif des données déterminantes pour le calcul des charges (article à paraître).

Le géomécenic se trouve ainsi doté d'une gamme d'outils entièrement nouvelle qui lui permet un meilleur exercice de ses responsabilités. Il lui est beaucoup plus facile de comprendre la cinématique d'une rupture potentielle, d'anticiper les possibles déformations et déplacements, de rechercher comment une légère modification de direction ou de pente d'un plan de terrassement peut permettre de minimiser des problèmes de stabilité qui auraient pu être très graves.

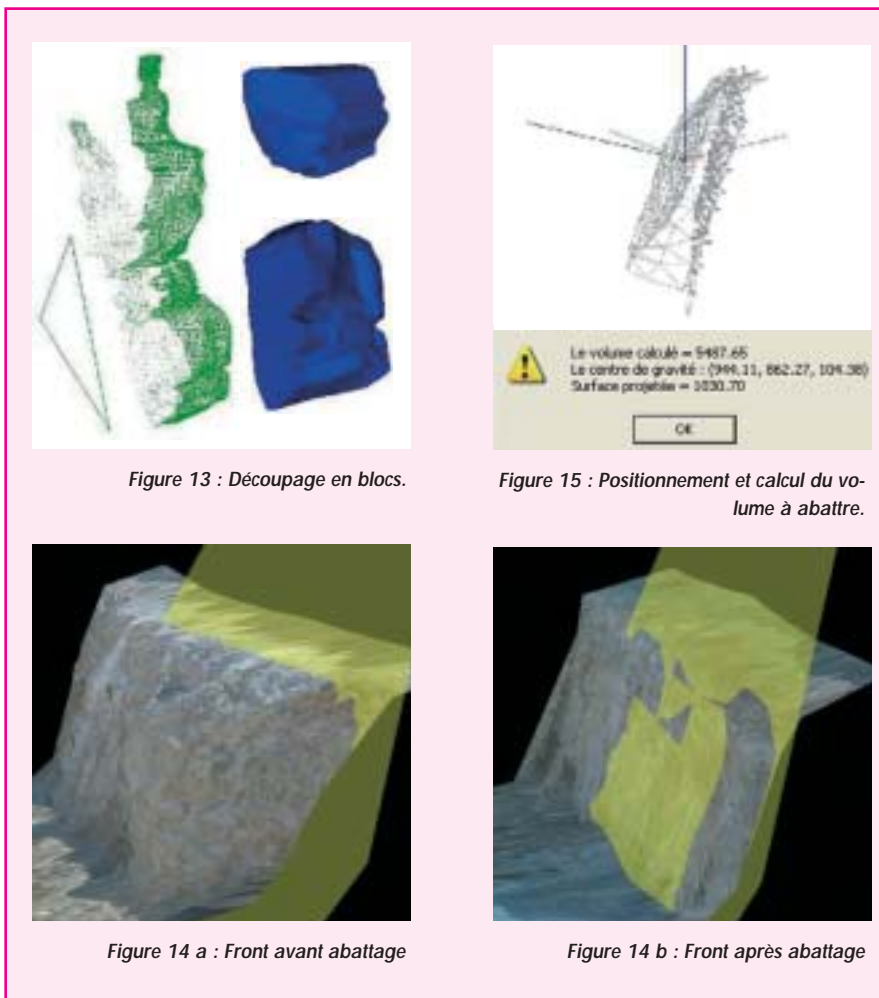


Figure 13 : Découpage en blocs.

Figure 15 : Positionnement et calcul du volume à abattre.

Figure 14 a : Front avant abattage

Figure 14 b : Front après abattage



Figure 16 : Modèle en facettes d'un front d'environ 100 mètres de hauteur

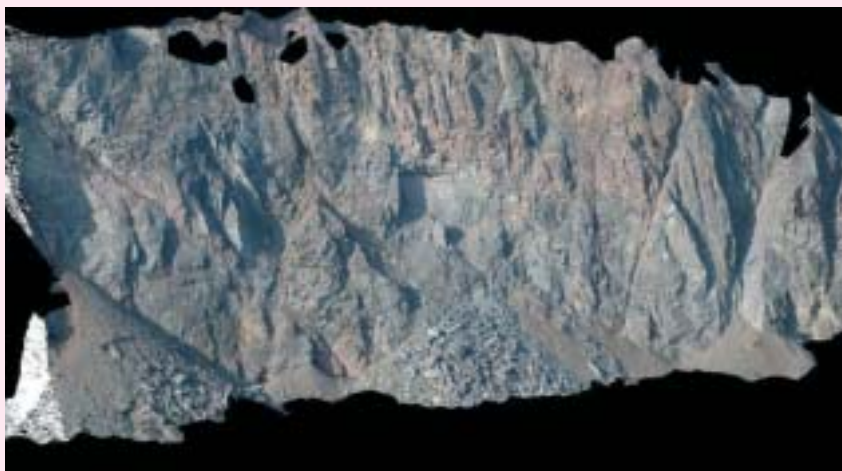


Figure 17 : Photomodèle correspondant

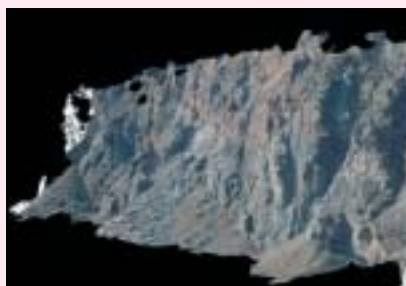


Figure 18 : Le photomodèle sous un autre angle



Figure 19 : Le calcul des lignes de niveau



Figure 20 : Les courbes de niveau en projection horizontale : inexploitable en mode traditionnel

Mise en sécurité et réhabilitation d'une ancienne carrière

Les dimensions de cette ancienne carrière sont importantes (43 hectares), les plus grands fronts mesurant jusqu'à 500 m de long pour 100 m de hauteur. En raison du mauvais état des fronts, il était nécessaire de concevoir des travaux de remodelage tout en assurant une compatibilité avec la future utilisation du site et, bien naturellement, une réhabilitation paysagère.

Du point de vue mécanique et sécurité, les méthodes évoquées ci-dessus ont été très efficaces. Elles ont permis de proposer des options de remodelage économiques et fiables et notamment de trouver un équilibre financier entre abattages de sécurité et dimensionnement d'ouvrages de protection en base de fronts.

D'un point de vue réhabilitation paysagère, le travail sur modèle virtuel a permis de rechercher avec les divers acteurs concernés un consensus sur le projet (Figure 16 à 20).

Surveillance d'évolution d'un front rocheux sous l'effet de terrassements en masse à l'explosif

Il s'agit ici d'un front rocheux d'une trentaine de mètres de hauteur qui a fait l'objet d'un reprofilage particulièrement réussi grâce à des techniques d'abatage adaptées.

Un certain nombre de blocs demeureraient en équilibre précaire au sommet du front et ils ont été purgés par une entreprise de travaux acrobatiques.

Un modèle tridimensionnel obtenu avec des moyens photogrammétriques terrestres avait permis de concevoir et contrôler les divers travaux. Les méthodes utilisées étaient les mêmes que celles évoquées ci-dessus, à ceci près que le modèle en facettes réalisé à partir de points photogrammétriques avait une résolution beaucoup moins fine que le modèle lasergrammétrique, mais cependant suffisante pour la conduite du projet et beaucoup plus efficace que les approches 2D utilisées jusque là.

Mais des tirs importants devant se poursuivre sur le carreau de la carrière, d'aucuns craignaient qu'ils ne provoquent des déstabilisations du front nouvellement reprofilé.

Pour lever ces doutes, le carrier a résolu d'investir sur un double relevé laser-



Figure 21 : Le secteur surveillé



Figure 22 : Les déformations mesurées

grammétrique, avant et après une opération d'abattage très lourde en pied de front : il s'agissait d'un tir de 4 tonnes d'explosif.

L'objectif était de détecter si un tel tir avait fragilisé le front présumé sensible. On montre figure 21 et 22 le front habillé d'un photomodèle, et le même en facettes, avec, en couleurs, les zones pour lesquelles le signal lasergrammétrique a été perturbé entre les deux mesures. On voit que les déformations restent extrêmement faibles et localisées sur les discontinuités et hors profils du talus, là où quelques cailloux de surface ont pu effectivement bouger, mais que les compartiments dont on doutait de la stabilité sont restés stables.

Etude géomecanique et structurale du quartier d'exploitation d'une mine

Il s'agit d'une mine de schistes bitumineux exploitée à des fins industrielles très particulières et par des méthodes traditionnelles car le tonnage produit reste très limité. Le renouvellement du permis d'exploitation a suscité des interrogations sur la sécurité et l'exploitant a voulu s'entourer de toutes les garanties nécessaires.

Le quartier d'exploitation est situé à 800 m de l'entrée principale de la mine. Les « veines » de minerai ont un

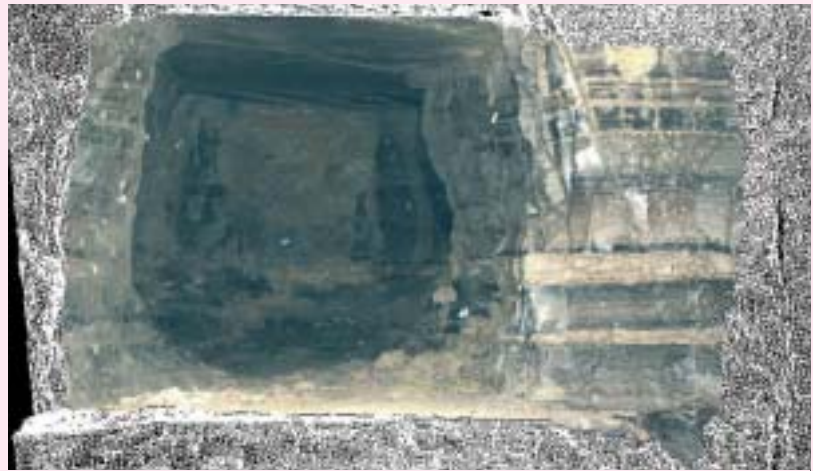


Figure 23 : Photomodèle de l'une des chambres

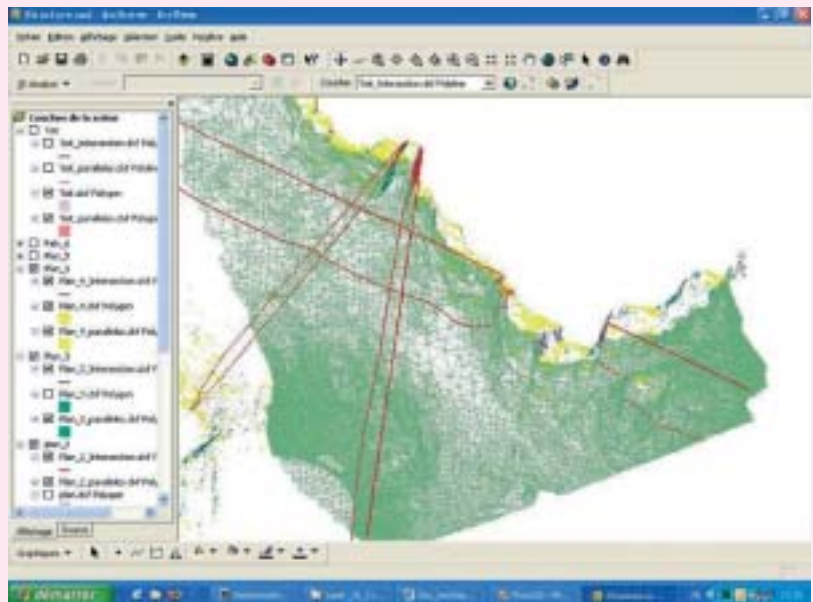


Figure 24 : Modèle en facettes en vue de dessus, avec inscription des principales directions structurales

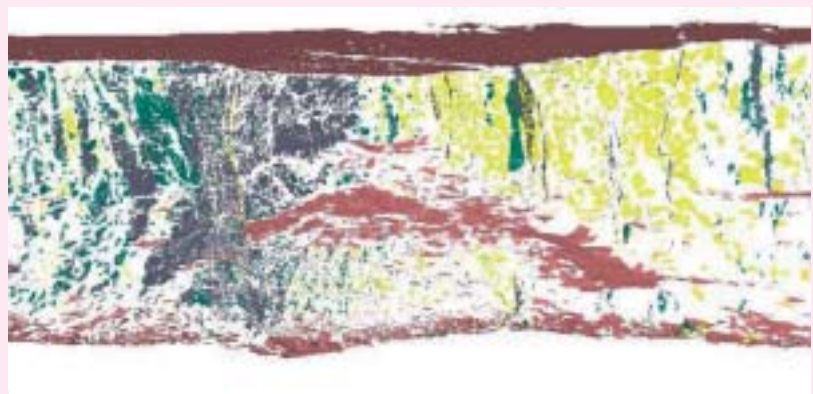


Figure 25 : Sélection et coloriage des facettes correspondant aux principales directions structurales



Figure 26 : Scan d'une chambre d'exploitation

pendage de 40° et le diamètre des galeries étant d'environ 4 mètres, l'accès aux chambres d'exploitation est assez difficile.

Les relevés lasergrammétriques ont été recalés sur les points géomètre déjà en place en utilisant une station totale pour pouvoir travailler dans le même système de coordonnées que le maître d'ouvrage. Au total, trois chambres d'exploitation de 10 mètres chacune et 100 m de galeries ont été mesurés en 2 jours, en haute densité (environ 1000 points au m²), avec une précision sur chacun de ces points qui est de l'ordre de 5 mm. Le nuage de points est maillé en 3D pour obtenir un modèle numérique triangulaire en utilisant les techniques mentionnées ci-dessus. Ce maillage est optimisé pour tenir compte des irrégularités spatiales de la roche (fortes densité sur les zones irrégulières, densités plus faibles sur les zones planes); la précision et la densité du relevé sont conservées, alors que la taille des fichiers et la maniabilité du modèle sont largement améliorées.

Le géomécancien a alors une vue réaliste et dynamique de la zone à étudier. Grâce à des fonctionnalités de traitement évoquées plus haut, il a pu identifier les principales familles de discontinuités, leurs espacements et la variation de ce dernier le long des galeries, enrichissant énormément les applications traditionnelles des canevas stéréographiques (figures 23 à 25).

Bilan et perspectives

Au-delà de la topographie classique, la lasergrammétrie constitue pour les géomécanciens et, à travers eux, pour tous les spécialistes des travaux au rocher, en surface comme en souterrain, un moyen extrêmement performant d'acquisition et de traitement de données tridimensionnelles.

Là où l'on devait auparavant se contenter d'approches en plans et en coupes pour la conception d'ouvrages, on peut traiter aujourd'hui de véritables maquettes 3D, à condition de savoir développer les modèles mécaniques cor-

respondants.

Il ne s'agit pas seulement de reproduire les méthodes appliquées en architecture ou en imagerie virtuelle qui ont permis ces dernières années des progrès sensibles en traitement urbanistique ou paysager. On ne se limite pas non plus au calcul des cubatures.

Les méthodes présentées brièvement ci-dessus annoncent des progrès qui devraient modifier profondément les méthodes d'analyse de massifs rocheux. Cela concerne aussi bien :

- les travaux en carrière,
- les travaux routiers,
- la prévention des risques naturels,
- les fondations d'ouvrages d'art
- la conception de barrages ou de tunnels.

Cela permet par exemple, grâce aux photomodèles, de conserver une image dimensionnelle du rocher qui peut se révéler utile plusieurs dizaines d'années après que celui-ci ait été noyé sous le béton.

Jean Pierre Asté, Nouridine Badji
et Alexandre Carbonel, GIPEA
Stéphane Hopp et David Desbuisson,
TPLM-3D
Pascal Lefebvre-Albaret,
Technodigit

Bibliographie

[1] ASTE, J.P, BURLET, D et CARBONEL, A, 2005 « Sécurité des routes de montagne ou des falaises en site urbain » Journées nationales de Géologie et de Géotechnique. Lyon, 2006

[2] ASTE, J.P, BADJI, N et BURLET, D, 2006 « GEOTRACE, système d'aide à la gestion des études géologiques et géotechniques de projets d'ouvrages linéaires » Symposium GEOLINE, Lyon, 2005

Contacts

TPLM-3D est une société de service lasergrammétrique spécialisée dans les domaines du BTP, de l'architecture et de l'industrie. Elle effectue aussi bien les relevés terrain, que la partie traitement des données.

3DRESHAPER™ est un logiciel de reverse engineering qui traite les nuages de points 3D quelle qu'en soit la provenance et couvre tous les besoins en terme de maillage 3D.

TPLM-3D

2 rue des Roberdières
Carrefour des Sept Chemins,
69680 Chassieu
tel : 04 78 26 90 10
fax : 04 72 37 29 04
<http://www.tplm-3d.fr>
info@tplm-3d.fr

GIPEA

Géomatique Ingénierie Prévention
Environnement Aménagement
503 avenue du 8 mai 1945
69300 Caluire

tél : 04 37 40 17 50
fax : 04 37 40 17 51
<http://www.gipea.fr>
email: gipea@gipea.fr

Technodigit

674 Rue des Grillons
69400 Gleize
tel : 04 74 07 09 04
fax : 04 74 07 09 43
<http://www.technodigit.com>
contact@technodigit.com