

LE SCANNAGE 3D DU TUNNEL MAURICE LEMAIRE

Bertrand Chazaly

Ingénieur Géomètre Topographe

Société ATM3D

► LE SCANNAGE 3D DU TUNNEL MAURICE LEMAIRE

La lasergrammétrie terrestre, ou scannage 3D, est une nouvelle technologie qui trouve peu à peu sa place dans la profession de géomètre topographe. L'extrême densité des mesures que les scanners 3D sont capables d'enregistrer offre de nouveaux produits livrables, particulièrement utiles pour le relevé et le contrôle d'ouvrages souterrains. En janvier 2005, ATM3D intervenait dans le Tunnel Maurice Lemaire pour numériser et photographier les 7 km de parois et de chaussée. C'était alors très certainement l'un des plus gros chantiers de numérisation 3D jamais entrepris. Cet article présente ce travail de numérisation et les résultats fournis au client. Dans le but de tester numériquement le passage du gabarit projet, 7000 profils ont ainsi été générés à partir d'une modèle 3D de précision centimétrique, et plus de 40 000 mesures ont été automatiquement extraites. Le déroulé orthophotographique au 1:50ème couvrant tout le tunnel et représentant plus d'un milliard de pixels a aussi été livré.

► ??????

Terrestrial 3D laser scanning is particularly suitable to civil engineering. The very high density of the captured information makes scanning logical alternative to traditional methods. At the beginning of year 2005, The 7 km long Maurice Lemaire Tunnel was scanned and photographed. A one centimeter accurate 3D mesh was produced, covering the whole surface of the tube. About 7000 profils were extracted every meter to test the position of the new project, and more than 40.000 distances were automatically measured to survey the interferences with the existing construction work. A 7 km long developed orthophoto was also produced, showing and positioning disorders at the scale of 1:50.

1 - LE LEVÉ HAUTE DENSITÉ

La lasergrammétrie¹ est une science ou une technique en plein essor qui exploite la technologie des scanners laser 3D (mesure laser haute densité, sans contact et longue portée). Un scanner 3D lève plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes, la mesure laser pouvant être couplée à une prise de vue photogrammétrique numérique.

Les technologies les plus répandues sont la triangulation (émission d'un point laser et enregistrement de son image dans un capteur CCD), la mesure du temps de vol (émission d'une impulsion laser et enregistrement du temps aller-retour) et le mesure par différence de phase (émission d'un rayon modulé en fréquence par une onde harmonique). Selon les méthodes, les appareils offrent des portées variant de quelques mètres à plus d'un kilomètre, des précisions allant du dixième de millimètre à quelques centimètres, et des vitesses d'acquisition allant de 500 à plus de 100 000 points à la seconde.

Développées à l'origine pour des applications industrielles, ces techniques de mesures se sont étendues à presque tous les champs d'intervention du topographe et en particulier au génie civil.

Leur dénominateur commun est la densité extrême du levé. Le principe est d'enregistrer en 3D tout ce qui est visible dans le champ de vision du capteur, généralement sur 360°. Les performances et la rapidité d'acquisition entraînent donc de profonds changements dans les méthodes d'enregistrement puis d'analyse de l'information.

Traditionnellement, une première observation de l'ouvrage est nécessaire pour définir

les zones où les relevés seront réalisés, ou pour fixer un pas régulier pour l'acquisition de profils. En dehors de ces zones, l'information n'est pas enregistrée. Avec le scannage 3D, le relevé devient plus objectif et offre une richesse qui se rapproche de celle du document photographique : l'extraction de l'information géométrique et son analyse minutieuse se font désormais en aval, une fois le relevé réalisé.

Cette évolution entraîne inévitablement une modification du regard sur l'ouvrage étudié, et apporte de nouveaux produits livrables.

Les avantages essentiels qu'offre la lasergrammétrie sont aussi la rapidité d'intervention et la possibilité d'effectuer des mesures longue portée sur des zones à accès difficile ou contraignant. A la différence du levé au tachéomètre, le levé par scanner 3D permet très fréquemment de travailler sous circulation, sur une seule voie et en balisage léger. Elle autorise aussi des mises en station en dehors des zones d'exploitation des ouvrages et selon des points de vues très favorables. Enfin, les appareils peuvent être pilotés à distance, ce qui peut réduire le temps de présence sur site des opérateurs à quelques minutes.

L'inconvénient majeur de la technologie est que les capteurs enregistrent absolument tout ce qui se trouve dans leur champ, y compris les objets qui n'ont pas forcément d'intérêt pour l'exploitation des résultats : véhicules ou personnel passant à proximité, poussière, équipements provisoires. Il faut procéder au filtrage des points mesurés, ce qui s'avère fastidieux quand l'ouvrage est particulièrement " bruité " ou quand sa dimension exige de nombreuses stations d'acquisition.

¹ En France, la terminologie n'est pas encore établie officiellement. " Lasergrammétrie " semble consensuel (" laser " + " gramma " , écrit ou dessiné, + " metron " , mesure) mais d'autres termes sont aussi d'usage dans cette toute nouvelle activité professionnelle : scannage 3D, 3D laser scanning, Lidar (light detection and ranging), levé haute densité (HDS© de Leica), laserométrie, laser 3D... Il faut aussi noter que certains capteurs haute densité n'utilisent pas le laser comme source de lumière, même si leur utilisation reste anecdotique en topographie.

ATM3D, jeune société créée en juillet 2003 par des topographes et des géologues, est spécialisée dans la mise en œuvre et le développement de la lasergrammétrie terrestre. Elle utilise une gamme de capteurs 3D et de logiciels de traitement lui permettant d'intervenir aujourd'hui dans les domaines de l'aménagement du territoire (tunnels, autoroutes), de l'énergie (centrales électriques, barrages), des risques naturels (glissements de terrain, chute de blocs) et du Patrimoine Culturel.

Elle possède quelques références en matière de relevés souterrains :

- le gouffre de la Verna dans les Pyrénées Atlantiques (Client : SHEM – But : optimiser le positionnement d'une conduite forcée le long de la paroi de la grotte),
- la cavité naturelle de Majlis Al Jinn au Sultanat d'Oman (Client : Sultanat d'Oman - aménager la cavité pour une exploitation touristique),
- les égouts de Saint-Etienne (client : société Ecartip pour le compte d'Eiffage – But : bilan précis des volumes de Béton injectés)
- les tunnels de Saint-Germain et de Châtillon sur l'autoroute A40 (client : société Gascogne Génie Civil pour Ingérop)

Le Tunnel Maurice Lemaire fait partie des références majeures de l'entreprise. Nous allons présenter dans les paragraphes suivants la prestation réalisée pour le compte du groupement Bouygues-Eiffage, en détaillant les données livrées conformément au cahier des charges et celles que nous sommes en mesure de produire pour un ouvrage similaire.

Caractéristiques du scanner Riegl LMS Z420i utilisé dans le TML



- portée maxi 800 m
- portée pratique constatée par ATM3D : 500 à 1000 m selon l'incidence, le matériau et la couleur
- précision sur 1 point : 10 mm
- précision par répétition de mesures : 5 mm
- champ horizontal : 360°
- champ vertical : 80°
- tête inclinable de 0 à 90°
- résolution angulaire maxi : 0.0025° (soit un point tous les 4 mm à 100 m)
- résolution d'un point : 5 mm
- vitesse d'acquisition : de 6500 à 10 000 points à la seconde
- information enregistrée pour chaque point acquis : coordonnées XYZ, couleurs RVB, intensité de réflexion
- capteur laser de classe 1
- capteur photographique 17 millions de pixels (interchangeable)
- optiques calibrées : 20 mm, 50 mm, 85 mm, 200 mm

2 - LA NUMÉRISATION 3D DU TUNNEL MAURICE LEMAIRE

2.1 - Le TML

Le Tunnel Maurice Lemaire, ou Tunnel de Sainte-Marie permet de traverser le massif vosgien, débouchant à mi chemin entre Strasbourg et Mulhouse. Sa longueur de 6872 m en fait le plus long tunnel routier situé sur le territoire métropolitain. Inauguré en 1937, ferroviaire à ses débuts, il est partiellement détruit pendant la seconde guerre mondiale, transformé en usine puis en bague avant d'être bombardé par les américains en 1944. Revendu par la SNCF et fermé en 1973, il s'ouvre au trafic routier en 1976. Sa fréquentation monte à près de 3500 véhicules par jour. Suite à la catastrophe du Mont-Blanc, il est fermé en 2004 afin de réaliser des travaux de sécurité : réaménagement du tube existant et percement d'une galerie de sécurité parallèle au tunnel par un tunnelier de 6 m de diamètre. La maîtrise d'œuvre a été confiée à Scetauroute pour le compte de la Société des Autoroutes Paris Rhin Rhône (SAPRR). Les travaux de génie civil sont réalisés par le groupement Bouygues-Eiffage.

La définition d'un nouvel axe de chaussée selon les contraintes liées au gabarit de circulation, avait pour but de minimiser le réalésage du revêtement existant du tunnel. Il était donc impératif de tester précisément le passage du gabarit selon ce nouvel axe.

Parallèlement, une analyse qualitative de la voûte avait besoin d'un fond de plans précis pour positionner et cartographier les informations repérées.

Bertrand Ravez, ingénieur Géomètre Topographe chez Bouygues TP, proposa de faire réaliser un relevé par scannage 3D photogrammétrique. Après consultation de plusieurs entreprises, ATM3D fut sélectionnée.

2.2 - La prestation d'acquisition 3D photogrammétrique

Le terrain

Après une visite préparatoire fin 2004, nous avons engagé le chantier de numérisation en janvier 2005. A cette époque, les opérations de démontage des caissons de ventilation s'achevaient. Les forages latéraux au niveau des futures galeries de communication entre les deux tubes, et le nettoyage des parois du tunnel étaient en cours. Ces opérations généraient un brouillard de poussière ou d'eau. A ces contraintes s'ajoutait le trafic important des véhicules de service et des engins de chantier. Il était donc préférable de réaliser la numérisation de nuit. Nous intervenions de 22h à 6h du matin, en dehors des zones de travaux.

Le tube recevait des équipements provisoires : gaines électriques, éclairage néon, tuyauterie. Ces installations fixées aux parois ont été scannées bien qu'elles n'avaient aucun intérêt pour l'étude.



Le scanner 3D est positionné grossièrement à l'axe du tube pour assurer une densité radiale régulière.

La méthode

Nous sommes intervenus avec le scanner 3D Riegl LMS Z 420i.

Le tunnel existant est un tube de près de 6900 mètres de long. Son profil en fer à cheval fait environ 8.5 m de large.

Des petites niches refuges ponctuent l'ouvrage tous les 25 m et 9 élargissements d'une trentaine de mètres de long et de 11.5 mètres de diamètre permettent aux véhicules en détresse de stationner.

Le scannage 3D du Tunnel Maurice Lemaire

Une première équipe est venue implanter et relever au tachéomètre environ 280 cibles réfléchissantes, en s'appuyant sur la polygonale implantée au préalable dans le tube.

Nous avons ensuite réalisé des stations de scannage 3D statique tous les 25 m, en face de chaque niche, le scanner en position horizontale puis verticale. Le diamètre du tube interdisait une distance plus grande entre les stations du fait de l'incidence du laser, rapidement rasante. La résolution choisie a permis d'enregistrer par station un point tous les 2 cm en moyenne à la surface de l'ouvrage.

Pour les prises de vues numériques, nous avons utilisé un capteur 17 millions de pixels équipé d'une optique calibrée grand angle de 20 mm. En se plaçant à l'axe du tube, le champ couvert par le capteur photographique était d'environ 6 m, un pixel représentant un carré de 2 mm de côté sur les parois. Nous avons donc réalisé des stations de prises de vues tous les 5 m, à l'axe, 5 photographies étant nécessaires pour que le panoramique couvre tout le tube. La mise en place d'un éclairage diffus de 600W a permis d'obtenir des images relativement lumineuses et contrastées.

Un ordinateur portable a piloté l'acquisition 3D et les prises de vues photo, enregistrant les données. Le calage des mesures était calculé, vérifié et validé in situ, de sorte qu'au petit matin, dès la sortie du tunnel, nous archivions des mesures calées et contrôlées.

Le résultat brut d'acquisition : l'archive 3D fondamentale

Quel que soit le type de capteur utilisé, le résultat d'une opération de numérisation est avant tout un fichier numérique contenant une série de coordonnées géométriques (X,Y,Z), constituant ce qu'on appelle un nuage de points 3D. A chaque nuage de points est obligatoirement associé la numéri-

sation fine d'une série de cibles dont les coordonnées sont connues dans le système de coordonnées du site. En option, l'intensité de réflexion des objets numérisés et des prises de vues numériques calibrées et orientées peuvent aussi être enregistrées. Toutes ces données, issues d'une campagne de levé sont alors les informations de base, vierges de tout traitement et constituant une archive brute de l'ouvrage, aux critères de précision, de résolution et d'accessibilité visuelle près.

Un seuil technologique est franchi : l'archive 3D permet à toute instant de revenir virtuellement dans l'ouvrage au moment où il a été numérisé, pour extraire et traiter l'information désirée. C'est le cas des mesures réalisées dans le tunnel Maurice Lemaire.

L'archive fondamentale du TML, de précision centimétrique, est constituée de :

- 282 stations scanner
- 4,9 millions de points acquis par positions
- 280 cibles relevées et numérisées
- 1407 stations de prises de vues photo
- un panoramique de 5 photos de 17 millions de pixels chacune par station, soit près de 7000 clichés, un pixel couvrant 1 à 4mm² à la surface du tunnel.

L'ensemble représente un nuage de plus d'un milliard de points 3D et une archive photographique de plus de 120 milliards de pixels, soit un peu plus de 100 Go de données numériques.

2.3 - L'exploitation des mesures

De l'archive au modèle maillé

L'un des procédés de traitement en lasergrammétrie consiste à produire un modèle maillé surfacique de l'ouvrage.

Un modèle maillé tridimensionnel est une véritable peau numérique qui permet de reconstituer la géométrie de la surface numérisée. La densité des triangles est soit équivalente à celle des points acquis soit simplifiée en fonction de critères géométriques précis compatibles avec les caractéristiques de l'ouvrage.

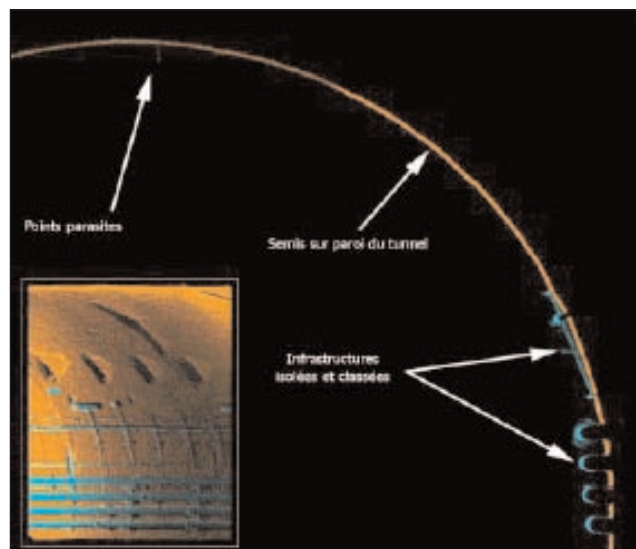


Le modèle maillé 3D des parois du TML.

Nous avons généré un ensemble de modèles maillés couvrant les 6900 mètres de la paroi et de la chaussée. L'objectif étant de passer le gabarit dans le tunnel, il a fallu au préalable éliminer l'image 3D des équipements provisoires fixés sur les parois du tube. Les gigaoctets de données à traiter interdisaient un traitement manuel. Nous avons donc développé une procédure de filtrage et de classement automatique des mesures en fonction de la géométrie des objets à la surface du tunnel. Nous n'avons ensuite utilisé que les points correspondant à la paroi et à la chaussée pour la construction du maillage 3D. L'ensemble des modèles calculés représente cette fois une archive surfacique du tube nu, de précision centimétrique, dont les fichiers au format binaire pèsent au total 4 Go.



Extrait du nuage de points 3D acquis dans le Tunnel Maurice Lemaire.



Filtrage et classement des points 3D acquis dans le TML.

L'extraction des informations cartographiques

Une fois le modèle surfacique réalisé et optimisé, il devient assez aisé de procéder aux traitements topographiques.

L'extraction de coupes et profils est facilement automatisable. La comparaison de deux modèles surfaciques d'un même ouvrage entre deux états ou avec son modèle CAO est également intégré dans les logiciels spécialisés (distances, volume). En revanche, les applications plus spécifiques au génie civil comme par exemple le passage de gabarit fait appel à des procédés que nous avons dû développer chez ATM3D.

La définition de l'axe projet a été communiquée sous la forme d'un tableau excel. Nous l'avons traduit en axe 3D, y avons positionné un plan de coupe perpendiculaire à l'axe tous les mètres. 6840 profils 3D ont été extraits de l'archive 3D et exportés vers Autocad. Dans chaque profil du tunnel a été placé en 3D le profil du gabarit.

L'information étant difficile à appréhender en 3D, nous avons traduit la cartographie 3D en cahier de profils 2D, à l'aide d'un programme mis au point pour l'occasion.

Pour chaque point métrique du TML, il est désormais possible de contrôler visuellement ou à l'aide des outils d'autocad la position du gabarit : largeur des trottoirs, distance entre le piédroit et le gabarit, distance radiale minimale entre le revêtement existant et les angles supérieurs du gabarit.

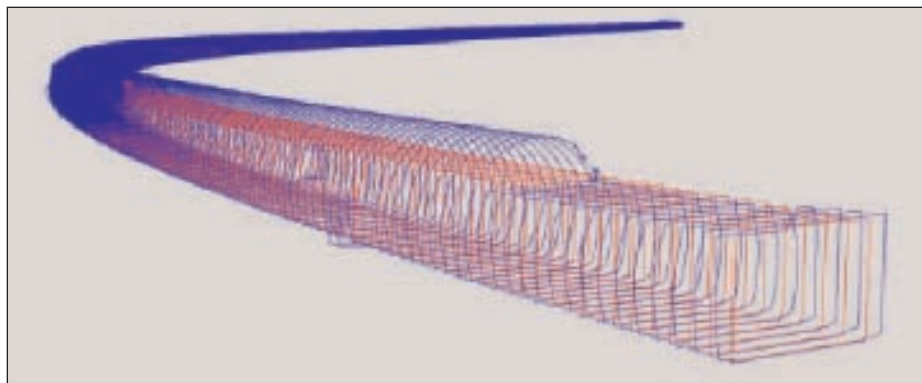
L'extraction des mesures de contrôle

Malgré la discrétisation des mesures sous forme de profils et la mise à plat des résultats dans un cahier de données 2D, la masse d'informations générées reste très lourde à gérer pour l'analyse du passage du gabarit. Il a fallu là aussi automatiser l'extraction de mesures de contrôle dans les 6840 coupes et leur compilation dans un fichier Excel.

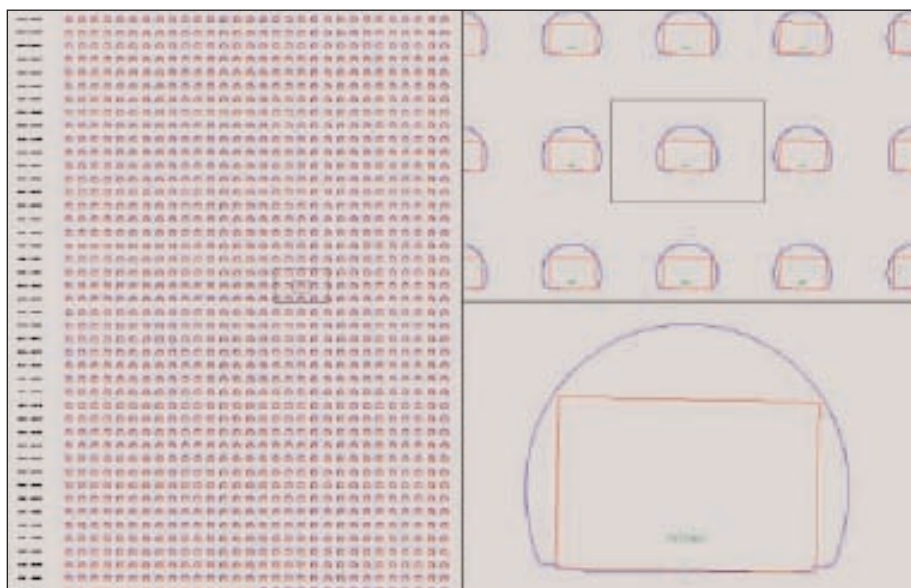
Plus de 40 000 mesures ont été extraites et enregistrées. Les fonctions d'Excel permettent ensuite de résumer les résultats pour chaque type de contrôle (distance minimale, maximale, moyenne, etc.) et de marquer les points métriques où les mesures atteignent des valeurs singulières.

Le déroulé orthophotographique de la voûte

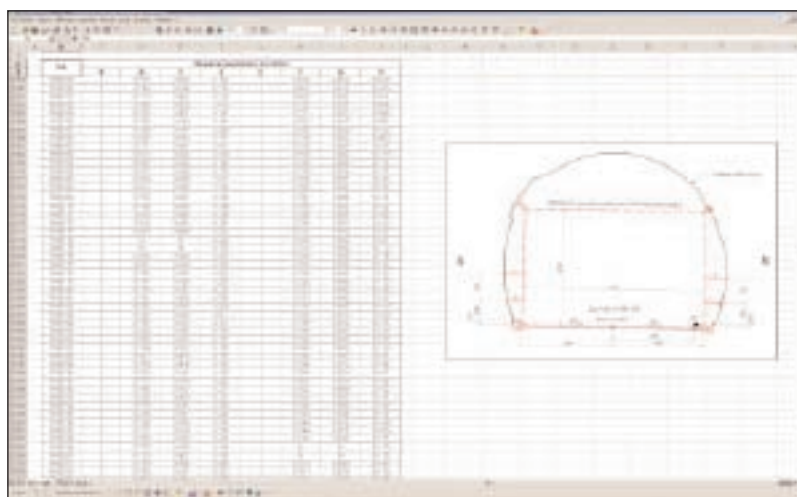
L'archive 3D enregistrée a permis de contrôler le passage du gabarit. Sa résolution centimétrique n'est cependant pas assez fine pour enregistrer la moindre aspérité. Une numérisation inframillimétrique permet ce niveau d'enregistrement. On parle alors de clonage numérique. Mais le temps nécessaire à une telle acquisition et le volume d'information généré



6840 profils 3D extraits et fournis sous Autocad.



Le cahier de 6840 profils 2D correspondant.



Plus de 40 000 distances de contrôle ont été extraites automatiquement et livrées dans un fichier Excel.

interdisent l'emploi de cette technologie à grande échelle.

Pour permettre une analyse qualitative de la voûte, le moyen le plus rapide et le plus efficace reste l'enregistrement d'une couverture photographique haute résolution.

Une photographie apporte une richesse d'information indiscutable, encore faut-il pouvoir positionner et cartographier cette information. L'orthorectification et l'assemblage des images traitées permettent ce géoréférencement.

Le scannage 3D du Tunnel Maurice Lemaire

Les 6800 clichés ont été corrigés des distorsions optiques, orthorectifiés selon le profil moyen du tunnel et assemblés en mosaïque d'images dans des planches au format autocad couvrant chacune un développé de la voûte sur 30 m, à 200dpi au 1/50^{ème}.

Chaque développé étant géoréférencé et à l'échelle, il est possible d'assembler plusieurs centaines de mètres d'images sous autocad et d'y digitaliser les informations visibles. Les 272 planches représentent un développé photographique de 6860 m de long pesant 1.4 Go octets.

La fourniture de la 3D

En lasergrammétrie, le levé passe du domaine discret au domaine continu, de la 2D (ou 2.5D) à la vraie 3D. Ceci pose alors le problème de la restitution des résultats. Ce point n'est pas à négliger lors de la mise en œuvre d'un procédé lasergrammétrique dont les résultats seront exploités par les progiciels de génie civil. Au delà de la contrainte strictement technique que peut engendrer la transformation des données pour une restitution dans un système 2D (papier ou numérique), c'est un problème de culture technologique, d'appréhension de la 3D qui est parfois posé. Il est alors regrettable que l'expertise finale se prive de l'ensemble de l'information 3D.

Il est possible de livrer l'information surfacique 3D. Nous avons réalisé et livré un test sur 50 m. Le client a reçu un extrait du modèle 3D maillé du tunnel, le gabarit extrudé en 3D le long de l'axe projet, l'axe projet symbolisé par une polyligne 3D et les points métriques. Le tout a été livré avec un logiciel permettant notamment la navigation dans l'archive 3D, la visualisation des interférences avec le gabarit, la mesure de distance et l'extraction de coupes.

Dès lors, le maître d'œuvre est en mesure de posséder et de gérer l'archive 3D du site numérisé, pour visualiser et extraire comme bon lui semble l'information recherchée.

CONCLUSION

Le chantier de scannage 3D du Tunnel Maurice Lemaire n'a pas posé de soucis majeurs. Trois mois et quelques nuits blanches auront été nécessaires pour mettre en place la méthodologie, développer les programmes, réaliser et traiter la numérisation 3D. Deux mois supplémentaires ont permis de fournir le développé orthophotographique complet.

L'archive 3D fondamentale, l'ensemble des modèles 3D maillés couvrant la voûte et la



Extrait de 130 m du développé photographique couvrant la voûte.



L'archive numérique du TM tient dans un disque dur de 120 Go.

chaussée, les 6840 profils en 3D puis en 2D, et les 272 déroulés orthophotographiques au 1/50^{ème} représentent un total de 112 Go de données. Enregistré sous cette forme, le TML tient dans un disque dur externe de 120 Go ! Au delà de l'exploitation technique des mesures, c'est un formidable état des lieux qui est enregistré avant la mise aux normes de l'ouvrage.

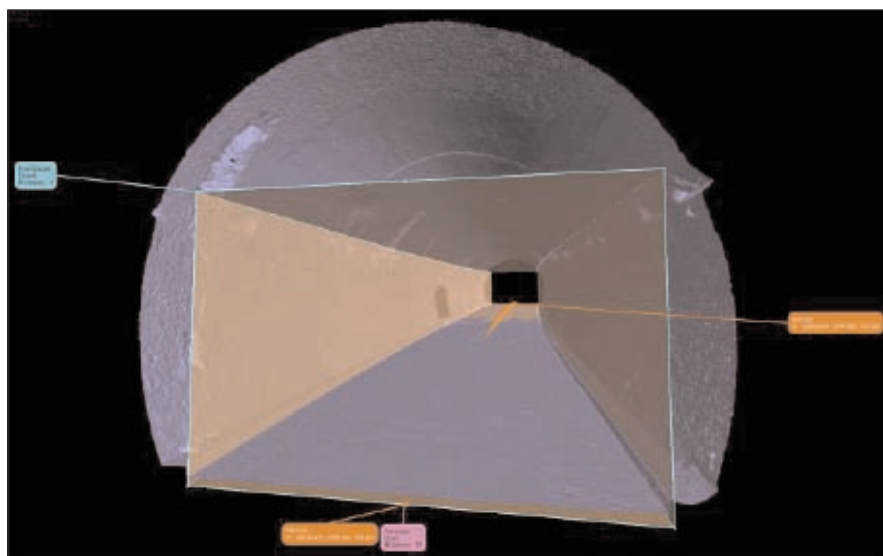
L'exploitation en 3D des résultats par le client n'est possible qu'à deux conditions : une culture technologique appropriée, et la démocratisation des logiciels de traitement. Les

écoles d'ingénieurs géomètres topographes ont aujourd'hui intégré la technologie de scannage 3D dans leurs cycles de formation. Les promotions qui sortent actuellement ont déjà reçu un minimum d'instruction dans ce domaine. Coté logiciel, des utilitaires permettent déjà la prise en charge de nuages de points 3D denses sous Autocad ou Microstation. Les prochaines évolutions concernent l'adaptation complètement de ces logiciels à cette nouvelle technologie.

Plus généralement, les développements à venir visent à mettre en place de véritables systèmes d'informations géographiques 3D, capables de prendre en charge les données 3D denses et d'y appliquer les requêtes nécessaires à l'extraction des renseignements indispensables à l'étude des projets.

Coté matériel, la course à la précision, à la portée et à la vitesse d'acquisition semble s'apaiser. La véritable révolution à mener concerne le coût des investissements, mais gageons qu'à l'image du GPS, le scannage 3D sera une technique de levé complètement intégrée dans les années à venir.

Plus d'information sur le scannage 3D et ses applications : www.atm3d.com



Un extrait de 50 m de tunnel en 3D livré au client.