



© GUILLAUME J. PLISSON POUR MRS

Travaux souterrains

Des risques peu visibles mais bien réels

La statue de Sainte-Barbe veille toujours. Tous les chantiers souterrains arborent à leur entrée une statue de la patronne des mineurs, des géologues et des pompiers, pour protéger les ouvriers. Car les travaux souterrains exposent à de multiples risques : éboulements, effondrements, incendies, manutentions de matériels, croisements de flux engins-piétons, risque biologique... L'exiguïté, la coactivité, le manque de luminosité, les problèmes de communication peuvent par ailleurs constituer des facteurs

aggravants en cas d'accident. Au-delà des chantiers de BTP, toutes les activités en souterrain – exploitation de carrière, entretien ou maintenance d'ouvrages existants – sont exposées aux mêmes types de risques. Les techniques ont évolué ces dernières décennies et la sécurité a progressé de pair. La gravité des accidents tend à diminuer. Mais si la sécurité a été renforcée et les conditions de travail améliorées, les efforts de sécurisation des travaux souterrains doivent malgré tout se poursuivre.

**Dossier réalisé par Céline Ravallec,
avec Jean-Paul Richez et Jérôme Lemarié.**

Revue de chantiers

Un univers à part entière

Les travaux souterrains constituent une activité à part : réalisés en espace confiné, peu visibles, chaque fois uniques, avec des techniques variées, et tributaires d'une ventilation ainsi que d'un éclairage artificiels, ils exposent à des risques aussi divers que des éboulements, incendies, chutes, écrasements...

Sous terre, les notions d'espace et de temps sont modifiées, ce qui confère aux personnes qui y travaillent un état d'esprit à part entière. L'environnement de travail particulier et les conditions d'intervention toujours nouvelles sont communs à ce microcosme, pour l'essentiel rattaché au BTP. Ces hommes sont du même univers, du même cercle, se croisent à travers le monde sur les chantiers. Les travaux souterrains concernent environ 1 300 salariés du régime général, soit 0,1% de l'effectif total. « *Le code risque 452DA concerne uniquement les entreprises spécialisées dans le creusement*, décrit Pascal Sergi, ingénieur-conseil BTP et responsable adjoint du groupe BTP de la Carsat Rhône-Alpes. *Mais ensuite,*

de multiples entreprises titulaires ou sous-traitantes, pas forcément spécialisées dans les milieux souterrains, y interviennent. Nous avons estimé, par exemple, que, en moyenne, 6 000 à 7 000 salariés par an seront mobilisés durant les périodes de fortes productions sur le projet de tunnel de 57 km entre Saint-Jean-de-Maurienne et le Val-de-Suse, en Italie, soit l'équivalent de 6% des salariés du BTP de la région ! » En extrapolant ces chiffres à l'ensemble des projets de tunnels, les effectifs concernés deviennent beaucoup plus importants... Les travaux souterrains, qu'ils soient horizontaux (galeries, chambres de grand volume, canalisations visitables), inclinés (descenderies) ou verticaux (puits de descente...), sont plus accidentogènes que les



Les travaux souterrains sont plus accidentogènes que les travaux en surface, du fait, notamment, de l'exiguïté et du confinement.



© PATRICK DELAPIERRE POUR L'INRS

Travailler en souterrain confère un état d'esprit "mineur", de travail collectif, qui se retrouve sur tous les chantiers.

travaux en surface. Ils présentent globalement les mêmes risques, mais avec des facteurs aggravants liés notamment au confinement et à l'exiguïté. Ils exposent également à des risques spécifiques, comme les effondrements ou les éboulements. La nature et la tenue du terrain comptent beaucoup dans l'organisation d'un chantier. « *Le soutènement d'un tunnel est décisif, il doit être adapté au jour le jour à la nature du terrain traversé* », décrit Philippe Sordoillet, expert BTP au département Expertise et conseil technique à l'INRS. « *Dans le cadre du groupe projet "Tunnels" que nous avons constitué au sein de la Carsat, nous avons souhaité évaluer les différents risques. Nous*

en avons identifié entre 20 et 25, certains inhérents au BTP, d'autres spécifiques aux travaux souterrains », présente Pascal Sergi (cf. *Pour en savoir plus,*

page 24). On peut mentionner les feux sur engins de chantier, les risques biologiques – par la présence d'animaux ou de moisissures en tunnels existants –,

Évolution de la réglementation

La réglementation sur la sécurité dans les tunnels routiers et ferroviaires a fortement évolué ces dernières années. L'incendie du tunnel du Mont-Blanc en 1999, qui a fait 39 morts, a provoqué une prise de conscience à l'échelle nationale et européenne des améliorations à apporter pour réduire les risques d'accidents en tunnel et en limiter la gravité⁽¹⁾. Une vaste campagne de rénovation et de mise aux normes des ouvrages de plus de 300 mètres est en cours. En Île-de-France, un important programme sur cinq ans, d'un montant global de 600 millions d'euros, concerne 22 tunnels représentant 45 km de tunnels cumulés, plus 15 km pour la seule ville de Paris.

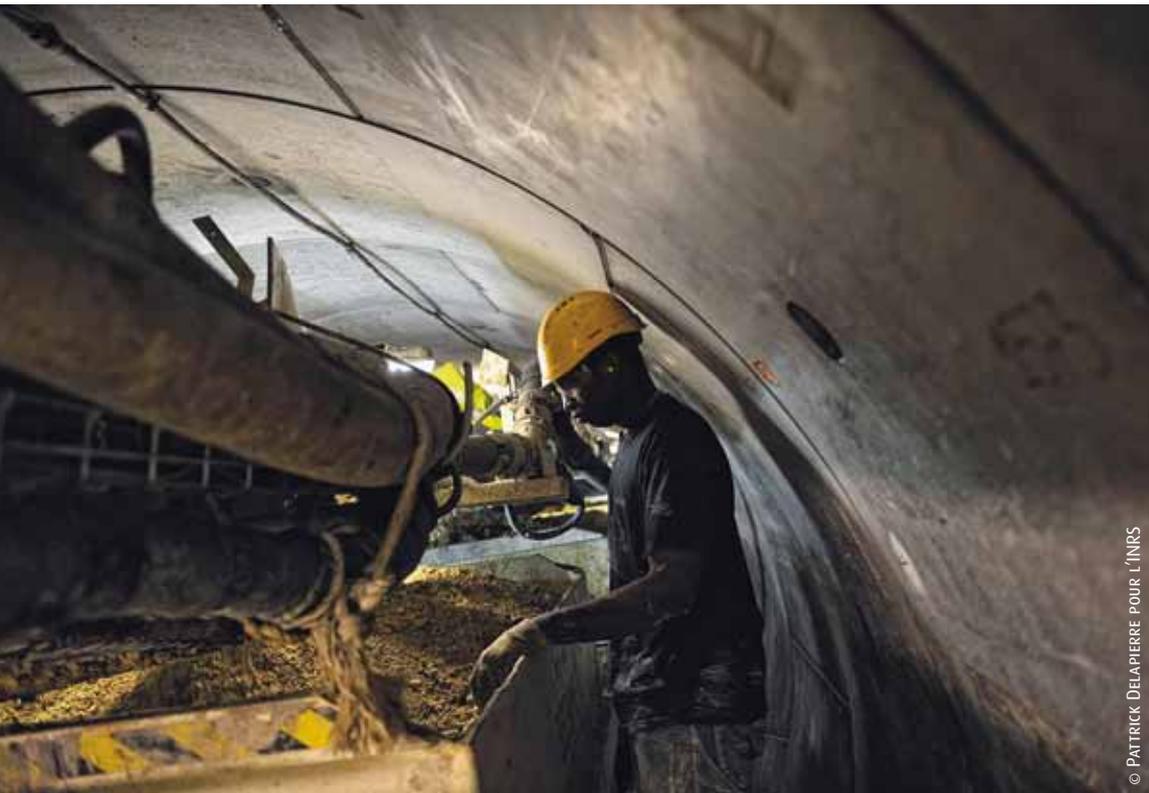
1. Décret n°2005-701 du 24 juin 2005.

la coactivité, les problèmes de communication entre ouvriers de nationalités différentes... La circulation des engins et des personnes peut également être à haut risque. Il y a souvent beaucoup de véhicules sur les chantiers souterrains. « *Un cheminement pour les piétons est habituellement délimité. Mais il y a toujours des nécessités qui impliquent que les piétons sortent du chemin balisé pour une intervention imprévue* », décrit-il encore.

D'autres risques auxquels on pense moins doivent également être pris en compte, comme les champs électromagnétiques. L'alimentation des engins électriques, dont l'utilisation est prioritaire pour éviter la pollution due aux gaz d'échappements et les risques d'explosions, nécessite de fortes puissances qui nécessitent une haute tension jusqu'à 20 000 V, l'équivalent d'une ligne à haute tension. « *Dans un environnement de travail confiné, quels effets peuvent avoir les câblages sous tension qui courent le long des tunnels? Idem en ce qui concerne des antennes-relais installées parfois pour que les ouvriers communiquent entre eux ou avec les équipes en surface?* », questionne Pascal Sergi.

Conditions de travail et sécurité

Toutes ces problématiques se retrouvent globalement d'un ouvrage souterrain à l'autre, même si l'environnement est chaque fois unique. C'est également vrai pour les travaux



Les conditions de travail sont essentielles dans la sécurisation d'un chantier souterrain. Le bruit et l'éclairage sont deux éléments prioritaires à prendre en compte.

mée, elle dépend en particulier des dimensions de l'ouvrage excavé. Les canars, ces grandes conduites fixées au ciel de la galerie pour renouveler l'air, peuvent occuper des espaces importants, de l'ordre de plusieurs mètres de diamètre. Si la ventilation n'a pas été suffisamment bien calculée, elle peut se révéler inadaptée voire inefficace. Or, elle est à la base de tout. Quand elle fonctionne bien, elle améliore le cadre des travaux. Dès qu'un dysfonctionnement ou une insuffisance surviennent, les conditions de travail s'en trouvent alourdis.

L'utilisation de plus en plus répandue de tunneliers, ces engins chargés de creuser la roche, a fait fortement évoluer le métier. Ils ont largement amélioré les conditions de travail et renforcé la sécurité des ouvriers, même si cela a parallèlement réduit le besoin de main-d'œuvre. Des améliorations peuvent néanmoins encore être apportées. Aujourd'hui, les tunneliers semblent avoir atteint leurs limites sur le plan de la dimension. Techniquement, ils pourraient encore aller plus loin, mais les gabarits existants répondent déjà aux besoins en termes de configuration de tunnels routiers ou ferroviaires. L'évolution à envisager pour les futurs projets concernera la profondeur de creusement, qui devrait augmenter dans les prochaines années. De fait, c'est l'accroissement de la pression qui modifiera encore les conditions d'intervention.

C. R.

Pour en savoir plus

- www.inrs.fr. Pour consulter ou télécharger la recommandation R352, « Travaux de creusement en souterrain de galeries, de puits ou de grandes excavations. Mise en œuvre de dispositifs de ventilation mécanique ».
- www.aftes.asso.fr. Association française des tunnels et de l'espace souterrain. Le prochain congrès international de l'Aftes aura lieu à Lyon du 17 au 19 octobre 2011.
- www.oppbtp.fr. Organisme professionnel de prévention du BTP.
- www.iau-idf.fr. Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France.

de maintenance ou de rénovation sur les ouvrages existants, ainsi que plus largement pour toutes les activités en souterrain (exploitations de carrières, travaux en égouts).

Au-delà des risques proprement dits, les conditions de travail sont essentielles dans la sécurisation d'un chantier souterrain. Elles demandent une solide organisation en amont. Le bruit et l'éclairage sont deux éléments prioritaires à prendre en compte. Le port de casques antibruit étant obligatoire, les opérateurs sont moins exposés, même si les nuisances à la source restent importantes. « *Mais parallèlement, les ouvriers doivent être hypervigilants, car ils sont de fait coupés de leur environnement* », commente Philippe Sordoillet. L'éclairage doit être adapté aux différents postes de travail, installé ni trop haut, ni trop bas, en étant ni trop puissant ni trop faible. « *L'eau peut devenir par ailleurs l'en-*

nemi n°1 sur un chantier souterrain », poursuit Pascal Sergi. La présence d'eau en grandes quantités – issue d'infiltrations à travers les roches ou de l'aspersion destinée à réduire l'empoussièrisme de l'ambiance de travail – peut constituer une grosse gêne dans l'organisation, en accroissant la pénibilité, en créant des instabilités de terrain, en augmentant les risques de glissades ou de chutes de plain-pied. Ces dernières font d'ailleurs partie des accidents du travail les plus fréquents, avec les manipulations d'objets. Les notions de pompage et de drainage sont par conséquent très importantes à intégrer en amont.

Tunneliers

La ventilation est un autre aspect fondamental sur un chantier souterrain. La recommandation R352 de la CNAMTS définit ses caractéristiques. Souvent sous-esti-

Ligne de métro

Creuser en milieu urbain dense

Le prolongement de la ligne 4 du métro parisien est en cours vers la banlieue sud. Le creusement du tunnel s'est achevé en novembre dernier. Retour sur une technique choisie dans un environnement urbain très dense.

Le chantier de la ligne 4

Le projet de prolongement de la ligne 4 du métro parisien – actuellement Porte de Clignancourt-Porte d'Orléans – sur 1,47 km représente un investissement global de 169,12 millions d'euros. De nombreuses techniques ont été mises en œuvre sur l'ensemble du chantier du fait de la diversité des travaux et de la complexité de l'environnement : travaux à ciel ouvert se raccordant aux ouvrages existants, travaux souterrains (creusement du tunnel ferroviaire, des couloirs, déviation de canalisations, etc.).

Le métro a rendez-vous avec Montrouge ! » Aux abords de la principale entrée du chantier, de grands panneaux de la RATP présentent aux riverains le projet de prolongement de la ligne 4 du métro vers la banlieue sud de Paris. Un creusement dans une zone fortement construite, où la densité d'immeubles anciens est importante. Opter pour une méthode par tunnelier dans un tel environnement, à faible profondeur (moins de 4,5 m de couverture par endroits), et pas-

sant à la fois sous le périphérique et parfois au-dessus d'anciennes carrières, n'était pas envisageable. Le terrain étant marneux au niveau de la voûte, le risque majeur était l'effondrement ou le tassement de terrain.

Le chantier, qui a débuté en 2008, avec la RATP comme maître d'ouvrage, pour une mise en service mi-2012, a été organisé en deux lots. Le lot 1, d'une longueur de 647 m, part de l'actuel terminus du métro Porte d'Orléans et passe sous le périphérique. Le lot 2, de près de 800 m, est situé sous la commune de Montrouge et prolonge le tracé vers le sud, en direction de Bagneux. Il comporte les ouvrages techniques (tunnels d'arrière-gare, poste de redressement). Les modes de creusement retenus sur les deux lots sont différents.

Le creusement du lot 2 s'est fait en traditionnel, à l'aide de pelles électriques radio-commandées de type Brokk. Le creusement du tunnel ferroviaire du lot 1 a été réalisé par la méthode Perforex® à l'aide d'une haveuse permet-



tant de réaliser une prévoûte. La machine ressemble à une immense tronçonneuse, avec une lame de 4 mètres de long et de 22 cm d'épaisseur. Elle est associée à un robot, l'ensemble étant monté sous une arche mobile épousant la forme du tunnel. Les prévoûtes sont constituées de panneaux remplis de béton projeté. Elles forment une coque qui assure la sécurité du personnel au niveau du front de taille, ainsi que celle des habitants en surface. Cette technique est privilégiée dans les environnements sensibles, présentant des sols tendres, notamment. 440 m de tunnel ferroviaire ont été creusés avec cette technique, avec une vitesse d'avancement allant jusqu'à 10 m par semaine.

« Face à la diversité des risques, il faut continuellement veiller

à ne pas tomber dans la routine. Des rappels des consignes de sécurité sont régulièrement effectués et des quarts d'heure de sécurité organisés, souligne Agnès Tiffocche, responsable sécurité et protection de la santé à la RATP. Étant donné que des équipes étrangères, notamment polonaises, sont intervenues, il pouvait y avoir des problèmes de communication. De plus, les différentes équipes n'ont pas forcément les mêmes cultures, ne savent pas forcément travailler ensemble. » Les consignes de sécurité

ont par conséquent été affichées en français et en polonais. Une interprète était employée sur le chantier.

L'intervention de la haveuse s'est terminée au début du mois de novembre 2010. Le lendemain, sur le site, la machine était à l'arrêt, en attente d'être démontée. Comme sur tout chantier souterrain, des problèmes de coactivité étaient aussi fréquemment rencontrés. « La gestion des flux, restreinte par la largeur du lieu, a été maîtrisée par la construction de plates-formes provisoires surélevées. Constituées d'une dalle de béton sur un remblai, elles séparent les flux d'engins des opérateurs intervenant sur les futures niches », précise Franck Billon, ingénieur sécurité chez Solétanche-Bachy.

C. R.

Tunnels routiers

Sécuriser les opérations d'excavation

La région Rhône-Alpes possède un relief propice aux chantiers souterrains. Les creusements de tunnels font depuis environ cinq ans appel à une nouvelle technique d'excavation : les émulsions pompées. Une technique employée lors de la construction du tunnel de La Bussière, dans le Rhône.

Tir imminent ! » Dans le tunnel de La Bussière, une voix annonce la prochaine opération d'excavation. Ce tunnel, long de 1 050 m, se situe sur les hauteurs de la ville de Tarare, dans le Rhône. Il fait partie du nouveau tronçon de 50 km de l'A89 qui, à terme, reliera Lyon à Bordeaux. Du fait de la topographie accidentée de la région, trois tunnels sont en cours de creusement sur ce tronçon. Comme le veulent les normes de sécurité des tunnels modernes, il s'agit de tunnels bi-tubes, constitués en fait de deux tubes parallèles, reliés tous les 300 mètres par des jonctions appelées rameaux d'intercommunications. Après quelques minutes

d'attente, bien que le tir ait lieu dans le tube parallèle à celui où l'on se situe, on perçoit très concrètement – et silencieusement – le souffle de l'explosion. La composition du sous-sol,

schistes et gneiss, rend les roches particulièrement dures à creuser et à évacuer. Pour ce type de terrain, différentes techniques d'excavation existent. La plus traditionnelle consisterait à utiliser des



© GUILLAUME J. PUISISSON POUR L'INRS

Un projet « Tunnels » à la Carsat Rhône-Alpes

Avec son un relief très accidenté, la région Rhône-Alpes est devenue une habituée des chantiers de BTP comportant des tunnels. « Jusqu'à il y a une vingtaine d'années, les chantiers souterrains étaient évités dans la mesure du possible, car coûteux, trop longs et à haut risque. Les tracés contournaient fréquemment les obstacles naturels, présente Pascal Sergi, ingénieur-conseil BTP et responsable adjoint du groupe BTP à la Carsat Rhône-Alpes. Aujourd'hui, les politiques, les nouvelles techniques et les budgets aidant, l'approche est totalement différente. Schématiquement, une ligne droite est tracée et les obstacles franchis. D'où les nombreux chantiers souterrains dans la région. » Un programme régional d'actions « Tunnels » 2009-2012 a donc été mis sur pied à la Carsat Rhône-Alpes. « Les tunnels sont de plus en plus complexes : conçus presque exclusivement en bitube, ils comportent des sas de sécurité, des équipements et des locaux

souterrains. C'est de plus en plus technique, avec une multitude de risques. Nous avons donc besoin de compétences multiples, d'échanges de connaissances et de retours d'expériences. Grâce à ce programme régional, qui favorise les rencontres, nous capitalisons les différentes compétences : collaborations entre le groupe BTP et le pôle chimie de la Carsat Rhône-Alpes, et également le centre de mesures physiques de la Carsat Auvergne, avec l'OPPBT et la Dirrecte 73, projets d'échanges avec la Cramif, projet de rédaction d'un guide de bonnes pratiques avec une collaboration du Centre d'étude des tunnels (Cetu), implication de club des coordonnateurs SPS, qui interviennent sur tous les chantiers. Par tous ces échanges, il s'agit non seulement d'améliorer la sécurité sur les chantiers mais également de mieux prendre en compte la protection de la santé des opérateurs », poursuit-il.

C. R.

Afin de limiter les émissions d'ammoniac, le front de taille est abondamment arrosé.

explosifs encartouchés pour faire sauter la roche. « Mais la manipulation de tels explosifs présente de nombreux risques. Leur transport et leur stockage sont très réglementés, présente Pascal Sergi, ingénieur-conseil BTP à la Carsat Rhône-Alpes. Il y a également des risques lors des manipulations des cartouches dans les trous de forage. Enfin, après utilisation, si toutes les cartouches n'ont pas explosé, les imbrûlés constituent pour les opérateurs un risque important d'explosion a posteriori, en particulier lors du marinage, l'évacuation des gravats. »

Face à ces contraintes, les responsables du chantier

ont opté pour la technique d'émulsions pompées, qui se rencontre davantage depuis quelques années sur les chantiers souterrains. Une matrice et deux réactifs, inertes individuellement, deviennent explosifs lorsqu'ils sont mélangés. Les deux produits sont injectés dans des canules installées dans des trous de mine. Ici, 148 trous sont forés dans le front de taille pour chaque tir. Le mélange et l'homogénéisation de ces réactifs chimiques se font dans un mélangeur situé à l'extrémité de la canule de chargement. Le produit devient explosible au bout d'une dizaine de minutes. L'explosion est déclenchée à distance par un opérateur. Avantage indéniable: le risque d'explosion lors du transport, du stockage et du mélange des composants avant activation est maîtrisé.

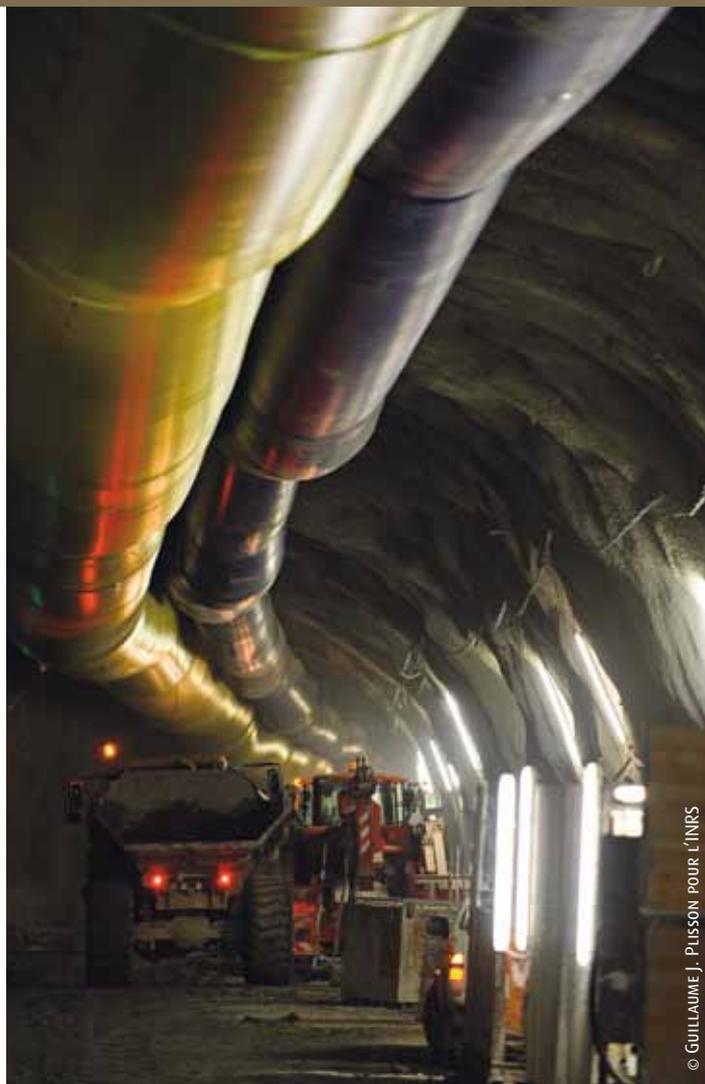
Ventiler et arroser

En revanche, cette technique présente l'inconvénient de générer des dégagements d'ammoniac lors du chargement de la matrice, du tir, et surtout après le tir, lors du marinage, où les poussières et les gaz peuvent être remis en suspension. L'ammoniac présente une toxicité par inhalation, ingestion et voie cutanée, ainsi que des caractéristiques inflammables et des risques de brûlures. Une vingtaine de minutes après le tir, nous sommes autorisés à nous approcher du front de taille. Au fur et à mesure de

l'avancée, une odeur d'ammoniac se dégage en effet, et devient de plus en plus forte dans le tunnel. Le port du masque se révèle nécessaire pour poursuivre la progression. Des seuils réglementaires d'exposition ont été définis: la valeur limite à court terme sur 15 minutes est de 14 mg/m^3 (20 ppm); la valeur limite de moyenne exposition sur 8 heures est de 7 mg/m^3 (10 ppm).

Afin de limiter les émissions d'ammoniac et leurs effets, la Carsat Rhône-Alpes et son laboratoire de chimie ont rédigé une recommandation régionale⁽¹⁾ présentant des mesures de prévention minimales à mettre en œuvre. Des ventilations adaptées avec des volumes suffisants sont la première préconisation pour

réduire les concentrations de gaz. L'ammoniac étant très soluble dans l'eau, il est par ailleurs recommandé d'arroser abondamment le marin, le front de taille, avant le tir, puis d'effectuer une brumisation après le tir et au cours du marinage. Ce qui évite la remise en suspension de poussières. Mais l'ammoniac élève par ailleurs le pH de l'eau dans laquelle il se dissout. L'eau, rendue très basique, doit donc être récupérée hors du chantier dans un bassin de rétention et y séjourner brièvement, le temps de redescendre à un pH neutre, avant d'être évacuée dans le réseau des eaux usées. Malgré ces contraintes, « l'utilisation des émulsions pompées représente un gain incontestable sur le plan de la sécurité », commente



© GUILLAUME J. PULISSON POUR L'INRS

Les émulsions pompées sécurisent les opérations d'explosion dans les tunnels, même si elles engendrent de nouveaux inconvénients.

Alexandre Dougnac, directeur des projets des tunnels de La Bussière et de Chalosse chez Spie Batignolles.

Au-delà de la technique d'excavation retenue et des mesures de prévention associées, le chantier du tunnel de La Bussière, qui a débuté en novembre 2009, fait par ailleurs l'objet d'une attention particulière sur les questions de sécurité. « Nous avons signé, en décembre 2009, une charte de sécurité avec le maître d'ouvrage, les Autoroutes du sud de la France, présente Stéphane Marabelle, contrôleur de sécurité BTP à la Carsat Rhône-Alpes. Au total, 1 500 salariés vont être amenés à travailler sur le chantier. Environ 150 entreprises ont signé la charte, qui comporte un socle commun BTP: hébergement, alimentation, déplacements... Un comité de pilotage a ensuite été chargé de mettre en œuvre la charte, avec notamment un groupe de travail sur les addictions, un autre sur les vibrations etc. » La phase de creusement, débutée le 23 février 2010, doit se clore fin avril 2011. La livraison du tunnel est prévue pour le mois de février 2012.

1. « Travaux souterrains, prévention des risques liés au dégagement d'ammoniac lors de l'utilisation d'émulsions pompées (dénommées aussi "explosifs pompables") », SP 1145. Recommandation rédigée en collaboration avec des groupements d'entreprises.

C. R.

Travail souterrain en hauteur

Une plate-forme sous les feux de la ra



Afin de faire face aux risques liés aux travaux de maintenance en tunnel, Satelec a imaginé son propre véhicule.

protection du luminaire fixé à la voûte, à le nettoyer, à changer les lampes défectueuses, à réparer les appareils électriques en panne et, parfois, à remplacer les câbles d'alimentation. Une intervention qu'il faut réitérer une ou deux fois par an. L'exploitant doit veiller à ce que le flux lumineux ne tombe pas sous certaines limites⁽²⁾. En effet, la baisse de sécurité des usagers résulte de la perte d'efficacité de l'installation, c'est-à-dire de la salissure des sources lumineuses et du nombre de lampes ou de tubes fluorescents défectueux.

Plate-forme stable

Après les incendies en tunnel, comme celui du Mont-Blanc en 1999, une mise à niveau de la sécurité des ouvrages de plus de 300 m de long a été lancée. Pour mener à bien ses interventions, Satelec Île-de-France a pris le parti d'innover. Ses équipes de maintenance disposent depuis peu d'un camion à plate-forme facilitant le travail en hauteur.

C'est bon, Didier, tu peux reculer tout droit. Pas trop. Reste comme cela. » Le camion plate-forme Satelec s'immobilise sur la chaussée de l'A86 dans le tunnel de Nogent-sur-Marne, en région parisienne. À plus de quatre mètres de haut, calé sur le plateau à l'aplomb des appareils d'éclairage, Arthur dirige la manœuvre du conducteur. Il est bientôt rejoint par l'équipe chargée d'assurer la maintenance des luminaires. « Cette plate-forme mobile de neuf mètres de long est conçue et équipée pour faciliter les différentes tâches de maintenance sur plusieurs appareils à la fois, commente Arnault Peugniez, responsable des services moyens de l'établissement

Satelec de Viry-Châtillon. Depuis plus d'un an, elle remplace un ancien bus transformé en engin à plate-forme mis au point dans les années 2000. » Les interventions de maintenance sur les installations d'éclairage en tunnel présentent une contrainte lourde pour l'exploitant, tant par le nombre d'heures qu'elles nécessitent annuellement que par leur fréquence. En tunnel urbain, elles sont programmées la nuit. « Ici, les services départementaux de l'équipement ferment les trois voies la nuit pendant 5 à 6 heures d'affilée », précise Arnault Peugniez⁽¹⁾. Satelec intervient comme prestataire en maintenance électrique. Ce travail en milieu empoussiéré consiste à démonter le verre de

« Le travail de nuit en hauteur sur des installations électriques, dans un milieu empoussiéré, présente des risques multiples », détaille Stéphane Gautherin, contrôleur de sécurité à l'antenne 91 de la Cramif, chargé du suivi de l'entreprise. Pour faire face à une augmentation de l'activité de réfection des éclairages liée au programme de mise à niveau des tunnels en Ile-de-France⁽³⁾, Satelec a pris le parti d'innover. L'entreprise n'a pas trouvé sur le marché d'équipement adapté à ses contraintes de chantier et améliorant de façon significative les conditions de travail des salariés. « Nous avons choisi de faire équiper un véhicule de 16 tonnes d'une plate-forme mobile de 9 m de long sur 2,5 m

de large », explique le responsable technique.

Outre ses dimensions inhabituelles, le véhicule est doté de deux cellules de service disposées de part et d'autre du vérin élévateur de la plate-forme. L'expérience antérieure a servi de référence. « *L'ancien véhicule aménagé en 2000 constituait un progrès*, explique Didier Magnaval, chauffeur. *Sa mise en œuvre présentait cependant des limites.* » En effet, la plate-forme fixe ne permettait pas d'adapter le niveau de travail à la hauteur, variable, des installations d'éclairage. Les interventions, astreignantes pour la majorité des salariés, pouvaient devenir risquées lorsqu'il fallait atteindre certains appareils placés très haut. « *Autre inconvénient*, souligne le chauffeur, *le moteur du camion, qui restait en marche pour alimenter les projecteurs d'éclairage, était une source de bruit et de pollution.* » Enfin, il fallait emprunter une échelle droite pour accéder à la plate-forme.

Confort et hygiène

Les aménagements du camion ont bénéficié des retours d'expériences et des échanges avec les opérateurs. La plate-forme est équipée de dispositifs hydrauliques permettant son déplacement en déport d'un mètre et en élévation de 1,25 m. Elle est munie de garde-corps partiellement escamotables, de façon à réduire le gabarit lors des déplacements. L'échelle d'accès est remplacée par un escalier.

Deux cellules sont implantées sur le plateau du véhicule : l'une est conçue pour faciliter les petits travaux et limiter les allers-retours, l'autre joue le rôle de vestiaire et permet au personnel de travailler et de faire des pauses « casse-croûte » dans de meilleures

conditions de confort et d'hygiène. Deux packs de batteries embarqués fournissent l'autonomie suffisante aux équipes de maintenance pour assurer l'alimentation électrique des projecteurs basse tension et des prises. Ils permettent ainsi de réaliser

et les conditions de travail », déclare le premier. En dépit des poussières de suies mises en suspension qui restent en préoccupation du CHSCT, l'amélioration est notable. Et l'investissement, d'un coût d'environ 200 000 euros, laisse espérer des gains de produc-

Éclairage et sécurité

Fonctionnant 24 heures sur 24, l'éclairage artificiel des tunnels est un gage de sécurité. Il est conçu pour offrir aux usagers des conditions de visibilité et de confort assez proches de la lumière naturelle. Il représente une part conséquente des dépenses de fonctionnement et d'entretien de ces ouvrages. Les tunnels sont généralement dotés d'une installation d'éclairage normal et d'une seconde garantissant la sécurité. En cas de panne de l'alimentation électrique, celle-ci assure une visibilité suffisante aux usagers pour leur permettre d'évacuer l'ouvrage souterrain dans leurs véhicules. Enfin, un éclairage spécifique assure un balisage lumineux, à hauteur, pour guider les usagers en cas d'évacuation à pied du tunnel.

Pour en savoir plus : Centre d'études des tunnels, dossier pilote des tunnels, section 4.2 éclairage, 2000, www.cetu.equipement.gouv.fr.



© PHILIPPE CASTANO POUR L'INRS

toutes les manœuvres de la plate-forme avec le moteur du camion à l'arrêt, ce qui réduit les nuisances sonores et les gaz d'échappement. Tous les espaces disponibles sont aménagés pour assurer le rangement du petit matériel, tel que câbles, boîtiers, tubes et ampoules, panneaux et cônes de signalisation. Enfin, le camion lui-même est équipé d'une caméra d'aide au recul. Didier Magnaval, comme Thierry Soyer, membre du CHSCT de Satelec, se félicitent du nouvel outil de travail qui a bénéficié de l'aide financière de la Cramif : « *Cette réalisation résulte d'une demande du personnel et de la volonté de la direction de l'entreprise qui souhaitait améliorer la sécurité*

Les aménagements du camion ont bénéficié des retours d'expériences et des échanges avec les opérateurs.

tivité. « *Nous réduisons les temps d'intervention puisque les équipes et le matériel sont acheminés et à pied d'œuvre beaucoup plus rapidement* », indique Arnault Peugniez.

1. Mis en service en 1987, le tunnel de Nogent-sur-Marne, long de 1 794 m, est formé de deux tubes de 2-3 voies chacun. Son trafic moyen journalier atteint 140 000 véhicules dont 15% de poids lourds.

2. Dans les tunnels qui reçoivent plus de 2 000 véhicules/jour par sens ou dont la vitesse autorisée dépasse les 70 km/h, les niveaux de luminance souhaités sont de 4 à 5 cd/m² sur autoroute ou sur voie de caractéristiques comparables et de 3 à 4 cd/m² dans les autres cas.

3. En Île-de-France, le programme de mise à niveau étendu sur cinq ans porte sur une longueur totale de 45 km, auxquels s'ajoutent 15 km pour les tunnels parisiens.

J.-P. R.

Tunnelier

Dans la peau d'une taupe

Une galerie souterraine est en cours de creusement en marge du chantier de prolongement du tramway T3 à Paris. Réalisé par le groupement Darras et Jouanin-CSM Bessac avec un tunnelier de trois mètres de diamètre, le tunnel hébergera à terme les installations de la Compagnie parisienne de chauffage urbain.

À une vingtaine de mètres de profondeur dans le sous-sol parisien, le nez collé au hublot, une manette dans chaque main, Smail Nid Mohamed est aux commandes d'un tunnelier baptisé Ghislaine. C'est lui qui pilote l'avancement de cette taupe géante de trois mètres de diamètre et 50 mètres de long. À quelques mètres devant lui, le front de taille, constitué de marnes et de calcaire, est rongé par la fraise qu'il manœuvre, à raison d'une douzaine de mètres par jour. Des gerbes de pierres jaillissent, la roche est grignotée, puis les gravats sont évacués au fur et à mesure par convoyeur. Réalisée pour le compte de la Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU), cette galerie est creusée en parallèle du chantier du futur tramway, dont le tracé empêchera à terme l'accès aux actuelles galeries de la CPCU. Elle longe en profondeur les boulevards extérieurs à l'Est

de Paris, sur un peu plus de deux kilomètres de long.

De par leur structure, les tunneliers comme celui-ci constituent un fort élément de sécurisation des conditions d'intervention sous terre. Ils sont de plus en plus présents dans les chantiers souterrains depuis 30 à 40 ans. « *Les voussoirs, ces segments en béton posés par le tunnelier au fur et à mesure du creusement et qui forment la voûte, présentent l'avantage de constituer à la fois le soutènement et le revêtement définitif du tunnel. Les risques d'éboulement ont été notablement réduits grâce à ce système* », présente Guillaume Hébraud, responsable qualité-prévention-environnement chez CSM Bessac, l'entreprise qui a construit et exploite le tunnelier. Néanmoins, d'autres risques persistent sur les chantiers souterrains, essentiellement liés à l'exiguïté et au confinement de la zone de travaux – surtout dans les tunnels de diamètre inférieur à 3 mètres, où les coursives de circulation sont particulièrement étroites.

Sans oublier, dans le cas présent, les manutentions d'éléments lourds comme les voussoirs, la circulation du train qui achemine et évacue hommes et matériels, ou encore le risque électrique,

le risque d'incendie ou le risque d'entraînement par le convoyeur à bande. Une formation aux feux en galerie a d'ailleurs été suivie par tout le personnel, *in situ*. Une simulation d'accident en tête de tunnelier a également été organisée en début de chantier avec les pompiers. Les principaux accidents rencontrés sur ce type de chantier sont des heurts, des pincements, des cognements, des entorses. Face à la densité urbaine environnante, la taille de l'emprise – puits vertical servant à la descente et à la remontée du matériel et du personnel – a dû être restreinte. « *Parallèlement à l'ascenseur, nous n'avons par exemple pas pu installer de tour d'escalier de secours. Nous avons dû nous contenter d'une échelle d'évacuation, validée néanmoins par les pompiers* », explique Guillaume Hébraud.

Concepteur et utilisateur

Le chantier est organisé en deux postes de production entre 7 h et 22 h, chacun comptant douze ouvriers, dont sept en tunnel, plus un poste de maintenance de six personnes, la nuit. « *Le travail souterrain s'apparente à une chaîne de production*, présente Romain Abbad, ingénieur travaux chez CSM Bessac. *Si un problème survient sur un des maillons, toute l'activité s'arrête, ce qui n'est pas le cas des chantiers traditionnels.* » « *Il y a un esprit de groupe, un esprit "mineur", sur les chan-*



© PATRICK DELAPIERRE POUR L'INRS

Les tunneliers sécurisent sensiblement les conditions de travail sur les chantiers. En revanche, les travaux préparatoires comme la construction des puits de descente présentent parfois une sécurité insuffisante.



© PATRICK DELAPIERRE POUR L'INRS

Une étude ergonomique est prévue pour améliorer le poste de pilotage du tunnelier, particulièrement exigü.

cuer les gravats, des garde-corps, amovibles à l'aide d'un dispositif pneumatique, ont été installés.

« L'histoire des tunneliers est intimement liée à la sécurité, résume Guillaume Hébraud. De nombreux aménagements ont été faits au fil du temps sur ces machines et il y a des améliorations permanentes. Je reste persuadé que la compétence et l'expérience sont les meilleurs modes de prévention. Et dans ce domaine, une de nos forces est que l'on conçoit et construit nos propres machines. » En effet, l'entreprise basée en

mis en œuvre des astuces ou des améliorations face à un problème rencontré. C'est une façon de faciliter la remontée des idées et de déployer les solutions sur d'autres chantiers confrontés aux mêmes problématiques.

Étude ergonomique

« Il y a une évolution inexorable dans le domaine des tunneliers. L'idée est que l'on soit moteur de cette évolution, et non qu'on la subisse », poursuit Guillaume Hébraud. Une étude conseillée par la Cramif sur l'ergonomie globale du poste de pilotage du tunnelier va ainsi prochainement être lancée, conjointement par le service ergonomie de Vinci, dont CSM Bessac est une filiale, et par le département Ergonomie cognitive de l'université Paris VIII. « Si des améliorations ont déjà été réalisées pour que le pilote ait un maximum de place pour ses jambes et soit correctement installé, des mesures seront faites dans le cadre de cette étude en termes d'aménagement global tenant compte de la position des commandes, des écrans de contrôle, des vibrations et des nuisances sonores liées au fonctionnement des moteurs hydrauliques », explique Guillaume Hébraud. De quoi poursuivre l'amélioration du quotidien de ces ouvriers invisibles et enterrés qui revendiquent une véritable passion pour leur métier et qui, pour rien au monde, ne remonteraient en surface pour travailler.

C. R.

CSM Bessac en bref

Créée en 1975 par Michel Bessac, l'entreprise CSM (creusement soutènement mécanisé) Bessac emploie 120 salariés. Filiale de Soletanche-Bachy, groupe Vinci, elle est spécialisée dans la conception et l'exploitation de microtunneliers et de tunneliers de moins de cinq mètres de diamètre. Son siège social, son bureau d'études et son usine sont basés à Saint-Jory, près de Toulouse. Elle réalise des creusements souterrains dans le monde entier.

tiers souterrains. On sait que quelqu'un de seul ne fera rien, on a tous besoin des collègues », confirme Pascal Briche, chef de poste et « homme sécurité ». Une des particularités de ce chantier est de nommer toutes les deux semaines un référent en charge de la sécurité, « l'homme sécurité ». Arborant un brassard orange « sécurité » qui l'identifie immédiatement, il sert de relais supplémentaire à la transmission d'informations entre le terrain et l'encadrement pour les questions de sécurité.

« Quand un problème se pose, on cherche des idées, on essaie d'améliorer en permanence les conditions de travail. Le fait de faire tourner la personne toutes les deux semaines est une bonne chose : la sécurité demande en permanence un œil neuf », commente-t-il. Comme le précise également Guillaume Hébraud, « c'est une façon d'impliquer tout le

monde à tour de rôle et de sensibiliser les équipes aux questions de sécurité. Lorsque les ouvriers voient que des actions sont rapidement mises en œuvre à la suite de leurs observations, il y a une meilleure adhésion à ces questions. » Parmi les actions correctrices menées par ce biais, certaines passerelles d'accès aux machines présentaient des espaces de la taille d'un pied. Ceux-ci ont été comblés pour supprimer tout risque d'entorse ou de chute. Aux abords des bennes qui servent à éva-

Haute-Garonne possède son propre bureau d'études : elle conçoit et fabrique ses machines. « Il n'y a aucun cloisonnement entre concepteurs et utilisateurs, c'est un atout énorme du point de vue de la sécurité. Il y a des retours d'expériences permanents entre le terrain et le bureau d'études, et des ajustements constants. Notre CHSCT est également mixte entre ateliers et chantiers. » Par ailleurs, un challenge sécurité interne a lieu tous les mois. Il récompense le personnel de chantier qui a

Carrière

Sous terre, les véhicules polluent aussi

Des siècles durant, la pierre de tuffeau a été extraite à la main des carrières des bords de Loire pour édifier villages et châteaux. Heureusement, la mécanisation a amélioré les conditions de travail. Engendrant également de nouveaux risques. L'entreprise Lucet, qui exploite une carrière dans le Maine-et-Loire, lutte contre la pollution due aux gaz d'échappement des engins de travail.

Si l'Anjou et la Touraine abritent un patrimoine architectural si exceptionnel, c'est en grande partie grâce à lui. Il donne aux châteaux, abbayes et habitations troglodytes de la région leur couleur blanc crème si douce et si lumineuse. Le tuffeau (cf. encadré) est extrait des sous-sols des bords de Loire, dans des carrières souterraines telles que celle de l'entreprise Lucet, à Brézé, dans le Maine-et-Loire. À quelques mètres sous terre, dans un dédale de galeries s'étendant sur 35 hectares, huit carriers sont exposés à divers risques pour extraire, chaque jour, des dizaines de blocs de pierre de 1 à 4 m³ environ (20 000 à 30 000 m³/an) : écrasement, intoxication par les fumées de gaz d'échappement des engins de chantier... sans oublier le bruit, assourdissant, des machines. « *Dès mon arrivée, explique Sébastien Guérif, PDG de la société Lucet, je me suis attaqué au problème de la pollution par les véhicules.* » Car, dans un environnement confiné tel qu'une carrière souterraine, même correctement ventilée, les risques d'intoxication sont importants.

Biénergie

Creusée entre 5 et 25 m de profondeur, la carrière se compose de deux galeries principales de 5 à 6 m de haut et de zones unitaires d'exploitation. En 2006, l'entreprise contacte la Carsat des Pays-de-la-Loire et le laboratoire interrégional de chimie de



l'Ouest (Lico) pour évaluer l'exposition des salariés à ces fumées et gaz d'échappement – considérés comme cancérigènes probables pour l'homme. À l'époque, les pots d'échappement des différents engins utilisés dans la carrière n'étaient pas équipés de filtres à particules de carbone. Les prélèvements d'atmosphère révèlent des expositions importantes au carbone élémentaire entre 0,18 et 0,20 mg/m³ – toutefois inférieures à la valeur limite d'exposition de 0,30 mg/m³ (cf. encadré).

L'entreprise décide alors d'équiper ses engins de chantier de filtres. Mais ceux-ci se révèlent vite inefficaces, car inadaptés au fuel domestique

couramment utilisé. En effet, ce fuel est « *moins raffiné et dix fois plus riche en particules de soufre* » que le diesel routier, explique Jean-Michel Bachelot, ingénieur-conseil à la Carsat des Pays-de-la-Loire. De plus, ces filtres nécessitent une température de gaz d'échappement supérieure à 250°C, ce qui n'est pas le cas des engins de chantier. Les particules de soufre ne sont pas brûlées et bouchent les filtres. L'entreprise a donc équipé ses deux principales machines, les haveuses qui découpent les blocs de tuffeau, de filtres de type Carmex CSC mieux adaptés aux engins de travaux publics.

De nouvelles mesures réalisées fin 2008 montrent une nette



© PHILIPPE CASTANO POUR L'INRS

Le bruit et les échappements de gaz générés par les véhicules rendent le travail dans les carrières de tuffeau particulièrement pénible.

En outre, à partir du 1^{er} mai 2011, l'utilisation obligatoire de gazole non routier – dont la concentration en particules de soufre est inférieure à 10 ppm – à la place du fuel (1 000 ppm) devrait optimiser le fonctionnement de ces filtres. Par ailleurs, l'entreprise envisage une solution encore plus radicale. « Supprimer la motorisation », lance Sébastien Guérif. Plus exactement, équiper la haveuse d'un moteur à biénergie: gazole pour les déplacements et électricité pour les petits travaux. Avec un objectif, « être au-dessus de 95% d'utilisation d'énergie électrique », poursuit-il.

La nouvelle haveuse à biénergie était attendue en mars 2011. « Pour le moment, seule cette machine en sera équipée, raconte Sébastien Guérif. On verra ensuite pour les chariots élévateurs. » En complément, ajoute-t-il, « nous avons mis en

place un système de ventilation forcée permanent avec des cheminées » dans l'ensemble des galeries. L'électrification des machines permettra de diminuer non seulement la pollution mais aussi les nuisances sonores. Un autre atout car pour Cyril Grobsheiser, carrier depuis dix ans chez Lucet, « c'est le bruit qui est le plus pénible à supporter ». Il est dû à la circulation des engins et à la réverbération sur les parois des galeries. Les protections auditives sont de rigueur à tous les postes de travail.

Purger le plafond

Pour protéger des risques de décrochage de morceaux de pierre, l'ensemble des galeries et des zones d'extraction a été définitivement mis en sécurité. Pour ce faire, deux opérations importantes sont réalisées. D'abord, la purge du plafond, réalisée à la main. C'est le dernier poste qui nécessite un effort physique, le reste ayant été mécanisé. « On utilise un burineur électrique qui fait tomber les croûtes de tuffeau », explique Sébastien Guérif. Ensuite, l'opération d'ancrage. « On fore des trous de 2 à 3 m dans le plafond, on y insère de la résine avec un durcisseur puis une tige en fibre de verre. L'ensemble durcit et permet de maintenir le plafond. » Enfin, des piliers de confortement ont été creusés dans l'ensemble des galeries. En revanche, pas besoin de masques de protection respiratoire malgré l'émission de

Gazole et exposition

Le gazole émet une pollution toxique, voire cancérigène pour l'homme, comprenant des gaz (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, oxydes de soufre...) et des particules fines de carbone. En France, il n'existe pas de valeur limite d'exposition pour les particules fines de carbone. On se réfère à la réglementation allemande qui fixe cette limite à 0,3 mg/m³ pour les travaux souterrains autres que les mines de charbon. Seuls la Suisse et les Pays-Bas imposent la mise en place de filtres à particules sur les engins de BTP.

Concernant la teneur maximale en soufre des carburants, elle est fixée par la directive 2003/17/CE à :

- 1 000 ppm (ou mg/kg) pour les véhicules non routiers (depuis le 1^{er} janvier 2008);
- 10 ppm (ou mg/kg) pour les véhicules routiers (depuis le 1^{er} janvier 2009).

Pour en savoir plus : Émission diesel. Performances des filtres à particules pour engins non routiers – Note documentaire ND 2323, INRS.

de poussières lors de la découpe. Car l'exposition des salariés est très faible. « Le tuffeau est une pierre très humide, explique Jean-Michel Bachelot, et ne contient pas de silice. Sa poussière est donc moins nocive. » Quant aux conditions de luminosité, les équipes travaillent en éclairage intensif. En effet, dans la pénombre de cette carrière, on travaille comme en plein jour.

J. L.

Une pierre au cœur tendre

Le tuffeau est une pierre calcaire à grain fin, formée par l'accumulation de sédiments âgés de 90 millions d'années. Il contient de nombreux fossiles. Tendre et très poreuse (si elle sèche à l'air libre, elle peut perdre jusqu'à 250 litres d'eau pour un bloc de 1 m³), cette pierre noble est aussi très sensible aux intempéries et à la pollution. Un bloc de 1 m³ peut peser jusqu'à 1,7 tonne. Le tuffeau a été massivement exploité entre les XVII^e et XIX^e siècles. Délaissé au milieu du XX^e siècle, il renoue avec le succès dans les années 1960, à l'occasion de la rénovation de l'abbaye de Fontevraud.

Restauration de caves

S'éloigner du risque le réduit

Les travaux d'entretien et de restauration de caves font partie de ces interventions peu visibles, et pourtant à risques. L'entreprise de travaux publics Bec Construction Champagne et la Carsat Nord-Est se sont mobilisées pour réfléchir à des moyens d'intervention sécurisés.



© GAËL KERBAOJ / INRS

Après avoir envisagé différentes approches, comme des méthodes utilisant des ultrasons, la solution d'un engin radiocommandé a été retenue. Ce dernier se trouve ainsi exposé à la place des salariés.

ainsi qu'à la pluviométrie. Elle peut perdre en résistance et en cohésion », présente Joël Véronèse, contrôleur de sécurité à la Carsat Nord-Est. Des travaux de sondage sont ainsi réalisés régulièrement pour évaluer la stabilité de la craie. Si elle s'avère instable du fait de la variation d'hygrométrie, des tiges de forage de longueur variable y sont insérées pour consolider les galeries. Il y a trois ans, un salarié intervenant sur une cave lors d'une

telle intervention a été victime d'un accident du travail. Un bloc de craie s'est effondré en partie sur lui. S'il s'en est sorti avec seulement quelques égratignures, on a frôlé la catastrophe. Cela a constitué une sérieuse alerte sur le risque de ces opérations. « À cette occasion, nous avons pris conscience de la nature de ces travaux et de la dangerosité potentielle des activités en sous-sol », poursuit Joël Véronèse. « La craie peut être très dangereuse, c'est un matériau qui ne prévient pas », confirme Jean-Philippe Pinto, chef de chantier chez Bec Construction Champagne qui réalise ce type d'intervention. Ces activités ont peu évolué au cours du temps. Le principe est simple en théorie : il faut forer un trou dans la craie, insérer une résine qui fait office de colle, puis y introduire la tige dans le forage et sa platine. Réalisée manuellement en binôme, cette opération est pénible : travail de force, bras en hauteur la majorité du temps... Et l'instabilité de la craie la rend risquée. À la suite de l'accident survenu il y a trois ans, la Carsat Nord-Est, l'entreprise ainsi que plusieurs équipementiers (ATC, Concentral, Minova) ont réfléchi à une solution pour écarter ce risque. Après avoir envisagé différentes approches, comme des méthodes utilisant des ultrasons, la solution d'un engin radiocommandé a été retenue. Ce dernier se trouve ainsi exposé à la place des salariés. L'engin électrique est

équipé d'un fleuret pour forer la voûte et d'une glissière à tige pour insérer les tiges en acier. L'opérateur qui dirige l'engin est ainsi à distance. Parallèlement, son collègue peut se positionner sous une cabane de protection mobile, spécialement conçue pour l'abriter en cas de chute de craie. Le travail de forage ne se fait donc désormais plus manuellement. Le dispositif, qui a coûté 220 000 euros, est opérationnel depuis deux ans et donne satisfaction aux utilisateurs. Il a grandement amélioré les conditions de travail, tant au niveau du risque que de la pénibilité. « C'est beaucoup plus facile d'utilisation et beaucoup moins fatigant physiquement, explique José Gonzalez, un opérateur. En revanche, on piétine désormais davantage. »

Une dernière opération manuelle expose encore pour l'heure l'un des ouvriers, celle qui consiste à enfiler la cartouche de résine pour fixer les tiges. « C'est à l'étude, nous réfléchissons à une façon de régler ce problème. Nous espérons trouver une solution dans les prochains mois », présente Jean-Philippe Pinto. Le fait que la télécommande du pilote soit également reliée par un câble à la machine limite les possibilités d'échappement en cas d'incident. « Il a fallu près d'un an de réflexion collective, impliquant toutes les personnes concernées de près ou de loin, pour aboutir à la bonne machine, conclut-il. Et cela a permis de vrais progrès. »

C. R.