

ECOMINT – ETANCHEITE PAR COQUES MINCES EN TUNNELS

ECOMINT – WATERPROOFING TUNNELS BY THIN SHELLS

Catherine Larive¹, David Chamoley¹, Pascale Clerec², Gil Espic³

¹ CETU, Centre d'Etudes des Tunnels, Bron

² Conseil Général de Savoie (73)

³ ETANDEX, Agence de Lyon

1. INTRODUCTION

Les venues d'eau sont très fréquentes dans les tunnels anciens non étanchés ; elles sont plus limitées mais également présentes dans certains ouvrages neufs bénéficiant pourtant d'une étanchéité extradossée. Leur traitement est souvent difficile, en particulier lorsqu'on dispose de peu d'espace disponible.

Les injections d'arrêt d'eau permettent des traitements sans épaisseur mais elles sont plutôt dédiées à des traitements locaux et leur durabilité n'est pas garantie sans traitement confortatif [1]. De plus, elles ne sont pas applicables dans les tunnels au rocher.

Le MEDDE, Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'énergie, lance chaque année des appels d'offres à projet d'innovation routière. En 2012, l'entreprise d'étanchéité ETANDEX a été l'un des six lauréats, avec un projet sur le projet ECOMINT : Etanchéité par COques MINces en Tunnels.

Trois procédés innovants de traitement des venues d'eau doivent être testés en vraie grandeur. Ils répondent à la plupart des configurations d'ouvrages : tunnels en béton projeté, coffré ou préfabriqué, maçonneries, tunnels au rocher.

Le premier site expérimental retenu est le tunnel des Echelles ; c'est le plus ancien tunnel des Alpes (percé de 1804 à 1813). Long de 294 m, il est situé dans le département de la Savoie et géré par le

1. INTRODUCTION

Leaks are very frequent in old tunnels which have not been properly waterproofed; they are more limited but also present in certain new structures despite external waterproofing. The treatment of the leaks is often difficult, especially when there is not much room available.

Water leak stoppage injections allow for thin treatments but these are limited to local treatments and their durability is not guaranteed without reinforcing treatments [1]. Moreover, they cannot be applied in rock tunnels.

Every year, MEDDE, the French Ministry for Ecology, Sustainable Development and Energy, launches a tender offer for road innovation. In 2012, the waterproofing company ETANDEX was one of the six winners of this tender, with a project named ECOMINT: Etanchéités par COques MINces en Tunnels (Waterproofing Tunnels by Thin Shells).

Three innovative methods for treating water leaks are to undergo full-scale testing. They are adapted to most tunnel configurations: sprayed concrete tunnels, cast or prefabricated concrete linings, masonry tunnels, rock tunnels.

The first selected experimental site was the "Echelles Tunnel"; it is the oldest tunnel in the Alps (dug from 1804 to 1813). 294 m long, it is located in Savoie and has been managed by the Conseil général 73 since 2006. Work was carried out in this

Conseil général 73 depuis 2006. Des travaux ont été réalisés dans ce tunnel en 1993 pour traiter les principales venues d'eau.

Des coques drainées en béton projeté armé ont été mises en œuvre sur l'une des têtes et dans les tronçons où il y avait le plus d'eau. Ces traitements n'ont pas donné satisfaction. En 2012, les cent premiers mètres du tunnel présentaient encore des venues d'eau importantes, provoquant la formation de stalactites et de verglas en hiver, et nécessitant de fréquentes interventions de l'exploitant.

Les dépôts de calcite sur la chaussée du virage de sortie (côté Les Echelles) avaient de plus conduit à rainurer la chaussée pour limiter sa glissance. Enfin, la géométrie très variable de cette tête rendait sa réparation particulièrement délicate (Fig. 1).



Fig.1. Tête du tunnel de géométrie variable

Le Département de la Savoie a décidé d'expérimenter les techniques ECOMINT pour améliorer la sécurité des usagers et alléger les contraintes d'exploitation hivernales dans ce tunnel. Il a financé la plus grande part du projet.

Deux autres maîtres d'ouvrage, intéressés par l'évaluation de ces procédés, ont aussi participé au financement : l'ATMB, gestionnaire du tunnel et de l'autoroute du Mont Blanc et RFF (Réseau Ferré de France), maître d'ouvrage des tunnels ferroviaires (pour la plupart très anciens).

Un protocole de suivi de l'expérimentation a été signé en avril 2013 entre le Département de la Savoie (CG 73), le CETU, chargé par le Ministère du suivi technique de l'opération et l'entreprise ETANDEX.

tunnel in 1993 to treat the main inflows of water.

Drained shells made from reinforced sprayed concrete were used on one of the entrances and in the sections where there was the most water. These treatments have not proved satisfactory. In 2012, the first one hundred metres of the tunnel still had substantial water leaks, causing the formation of stalactites and ice patches during the winter. This required frequent intervention from the tunnel operator.

In addition, because of calcite deposits on the road surface of the turn at the exit (on Les Echelles side), the road surface had to be grooved in order to reduce its slipperiness. Finally, the highly variable geometry of this entrance made it particularly difficult to repair (figure 1).

Figure 1. Tunnel entrance with variable geometry

The Département of Savoie decided to experiment with the ECOMINT techniques in order to improve the tunnel safety for its users and to reduce winter maintenance operations in this tunnel. They financed most of the project.

Two other significant infrastructure owners, interested in the evaluation of these methods, also participated in the financing: ATMB, manager of the Mont Blanc tunnel and motorway, and RFF (Réseau Ferré de France), owner of all of France's railway tunnels (most of them being very old).

A protocol for monitoring the experiment was signed in April 2013 between the Département of Savoie (CG 73), the CETU (Centre d'Etudes des Tunnels – the Tunnel Design Center of MEDDE), and ETANDEX. The CETU was mandated by the Ministry for the technical monitoring of the operation.

Après réception des travaux et rédaction par le CETU d'un premier rapport d'évaluation, des contrôles réguliers seront effectués pendant 10 ans pour vérifier la durabilité des procédés. Cette durée correspond à la durée de la garantie assurée par l'entreprise.

After the work was completed and accepted, the CETU has to draft a preliminary assessment report. Then, controls will be carried out on a regular basis for the next 10 years in order to check the durability of the repair methods. This duration corresponds to the duration of the guarantee provided by the company.

2. LES TROIS PROCÉDES ECOMINT

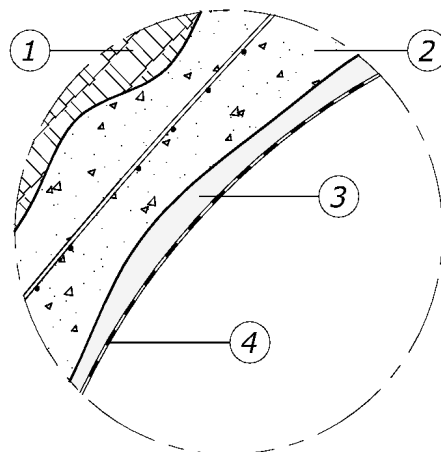
2. THE THREE ECOMINT METHODS

Le procédé TECTOPROOF CA : il s'agit d'un système d'étanchéité liquide adhérent à l'intrados. Il est composé (Fig. 2) :

The TECTOPROOF CA method: this is a liquid waterproofing system that adheres to the intrados of the vault. It is comprised of (figure 2):

- d'un primaire époxy pare-vapeur tolérant un support humide,
- d'un composite verre-époxy (ou carbone-époxy) constitué d'une matrice époxy pare-vapeur tolérant un support humide et d'un tissu de verre (ou de carbone) de différents grammages suivant la résistance à la fissuration souhaitée.

- a vapour barrier epoxy primer that tolerates a wet surface,
- a glass fibre-epoxy composite (or carbon fibre-epoxy) comprised of a vapour barrier epoxy matrix that tolerates a wet surface and of a glass fibre (or carbon fibre) fabric with different gram weights according to the desired resistance to cracking.



1. Rocky wall
2. Existing sprayed concrete
3. Waterproofing and surfacing coating
4. TECTOPROOF CA membrane

- ① Paroi rocheuse
- ② Béton projeté existant
- ③ Enduit d'imperméabilisation et de surfacage
- ④ Etanchéité TECTOPROOF CA

Fig.2. Principe du procédé TECTOPROOF CA

Figure 2. Principle of TECTOPROOF CA

Le composite a une épaisseur de 3 mm. Il est étanche à l'eau et à la vapeur d'eau et permet l'application de tout type de revêtement de finition.

The composite is 3 mm thick. It is waterproof and vapour-proof and allows for the application of any type of finishing coat.

Commercialisé par la société SPPM, le procédé bénéficie d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) pour des applications en bâtiments pour du cuvelage en sous-pression. Il a également obtenu un Avis d'Expert de l'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) pour des applications en souterrain [2].

Marketed by SPPM, the method benefits from an ATEX (technical experimental evaluation) from the CSTB (Scientific & Technical Centre for Building) for application in buildings for the waterproofing of underground structures located below the ground water table (mostly car parks). It also obtained an Expert Agreement for underground applications from AFTES, the French Tunnelling Association [2].

La mise en œuvre manuelle d'un composite époxy exige d'avoir un état de surface régulier qui peut être constitué :

Manually implementing an epoxy composite requires a regular surface which can be obtained by:

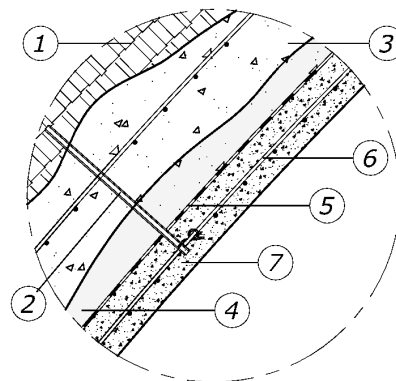
- d'un béton coulé en place, éventuellement ragréé ;
- d'un béton projeté revêtu d'un enduit de surfacage (épaisseur maxi 3 cm) ;
- d'une maçonnerie revêtue d'un enduit de surfacage (un drainage sera alors réalisé pour éviter la mise en charge de l'ouvrage).

La maîtrise des venues d'eau pendant les phases d'application est une condition indispensable à l'efficacité du procédé.

L'application en étanchéité « parapluie » dans les ouvrages de Génie Civil est tout à fait récente ; l'application en tunnel routier aux Échelles est une première réalisation.

Le procédé MasterSeal 345 : il s'agit d'un système d'étanchéité « sandwich », adhérent à l'intrados de la structure, composé (Fig. 3) :

- du support ;
- d'une étanchéité filmogène en EVA projetée à froid ;
- d'un béton projeté assurant le confinement et la protection de l'étanchéité.



- poured in place concrete, possibly scratched;
- sprayed concrete coated with a surfacing coating (max. thickness of 3 cm);
- masonry coated with a surfacing coating (draining will then be carried out in order to prevent a loading of the structure).

Controlling the inflow of water during the application phase is absolutely indispensable for the method to be effective.

Applying an "umbrella" seal in civil engineering structures is very recent; applying it in a road tunnel like at the Echelles Tunnel is a first.

The MasterSeal 345 method: this is a "sandwich" seal system, that adheres to the intrados of the structure, comprised of (figure 3):

- the surface;
- a waterproofing membrane made of cold-sprayed EVA;
- a sprayed concrete providing the confinement and the protection for the membrane.

- 1 Paroi rocheuse
- 2 Fixation mécanique
- 3 Béton projeté existant
- 4 Enduit d'imperméabilisation et de surfacage
- 5 Etanchéité MASTERSEAL
- 6 Treillis soudé
- 7 Béton projeté de confinement

1. Rocky wall
2. Mechanical fastening
3. Existing sprayed concrete
4. Waterproofing and surfacing coating
5. MASTERSEAL 345 membrane
6. Steel welded mesh
7. Containment sprayed concrete

Fig. 3. Principe du procédé « sandwich » MasterSeal345

Fig 3. Principle of the MasterSeal 345 "sandwich" method

L'épaisseur de la membrane d'étanchéité est de l'ordre de 3 mm ; celle du béton de protection est de 5 cm minimum. Dans l'application au tunnel des Échelles, le choix a été fait d'armer le béton de protection et de l'ancrer dans le rocher.

Le produit d'étanchéité MasterSeal 345 est commercialisé par la société BASF CC. Le produit a fait l'objet d'une demande d'Avis d'Expert auprès du GT 9 de l'AFTES, en cours d'instruction.

La mise en œuvre par projection permet d'avoir un support qui peut être constitué de :

- béton coulé en place éventuellement ragréé
- béton projeté revêtu d'un enduit de surfacage

The thickness of the waterproofing membrane is about 3 mm; that for the sprayed concrete is at least 5 cm. In the application in the Echelles tunnel, the choice was made to reinforce the protective concrete and to anchor it in the rock.

The MasterSeal 345 waterproofing product is marketed by BASF CC. The product has been submitted for an Expert Agreement from the working group 9 of AFTES, and is currently being reviewed.

Implementation via spraying makes it possible to have a surface that can be comprised of:

- poured in place concrete which may be scratched

(épaisseur maxi jusqu' 3 cm)

- maçonneries, éventuellement enduites (un drainage sera alors réalisé pour éviter la mise en charge de l'ouvrage).

Le procédé PROTHEANE AC/TI : il s'agit d'une coque semi-indépendante drainée ancrée. Le procédé est composé (Fig. 4) :

- d'une nappe drainante de type géogridle ;
- d'une résine polyuréthane projetée à chaud à prise instantanée (épaisseur 2 mm mini) ;
- d'un béton projeté armé ancré assurant la protection de l'étanchéité.

La coque d'étanchéité drainée est maintenue par des fixations en acier inoxydable traversant l'étanchéité et ancrées dans le rocher à raison de 4u/m² (nombre minimum pour maintenir le treillis soudé lors de la projection du béton).

- ① Paroi rocheuse
- ② Fixation provisoire de la nappe drainante
- ③ Nappe drainante
- ④ Etanchéité Prothéane AC projetée à chaud
- ⑤ Fixation définitive de la coque ancrée
- ⑥ Béton projeté armé d'un treillis soudé
- ⑦ Ecarteur

1. Rocky wall
2. Temporary fastening of the draining sheet
3. Draining sheet
4. Hot-sprayed Protheane AC waterproofing membrane
5. Final fastening of the anchored shell
6. Sprayed concrete reinforced with welded steel mesh
7. Separators

- sprayed concrete coated with a surfacing coating (max. thickness of 3 cm)
- masonry, which may be coated (drainage will then be carried out in order to prevent a loading of the structure).

The PROTHEANE AC/TI method: this is an anchored drained semi-independent shell. The method is comprised of (figure 4):

- a draining sheet of the geogrid type;
- a hot-sprayed polyurethane resin with instant hold (min. 2 mm thick);
- an anchored sprayed reinforced concrete providing the protection for the waterproofing membrane.

The waterproofing membrane is hold to the vault by stainless steel fasteners that pass through the membrane and are anchored in the rock. The minimum number of fasteners in order to maintain the welded mesh when spraying the concrete is 4u/m².

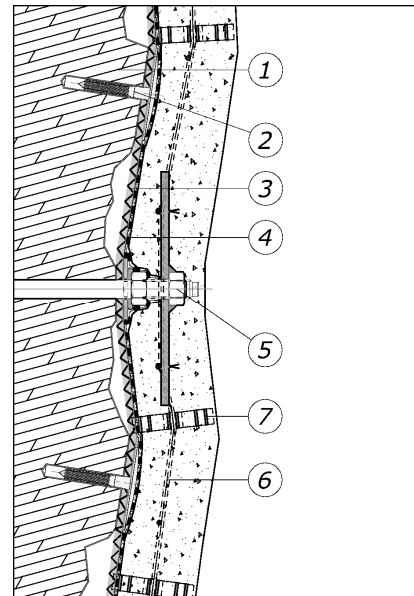


Fig. 4. Principe du procédé PROTHEANE AC/TI

Figure 4. Principle of the PROTHEANE AC/TI method

La mise en œuvre du système peut être réalisée sur tout type de support :

- béton coulé ;
- béton projeté ;
- maçonnerie ;
- tunnel au rocher.

Le procédé est commercialisé par la société SPPM. Il a fait l'objet d'une demande d'Avis d'Expert auprès du GT 9 de l'AFTES, en cours d'instruction.

Le niveau de résistance au feu N0 et le non-effondrement en chaîne lors d'un choc de véhicules ont été justifiés par une note de calcul.

Implementing the system can be carried out on any type of surface:

- poured concrete;
- sprayed concrete;
- masonry;
- rock tunnel.

The method is marketed by SPPM. It has been submitted for an Expert Agreement from AFTES, and is currently being reviewed.

The level of fire resistance N0 and the avoidance of a chain collapse in case of impact of vehicles were justified with a calculation note.

3. LES CONTROLES

Chaque procédé fait l'objet de contrôles classiques ou plus spécifiques qui ne sont pas présentés dans cet article. On peut se reporter à ce sujet aux actes du Congrès Mondial des Tunnels de 2014 (Larive et al., 2014).

Seul le procédé TECTOPROOF CA peut faire l'objet d'un contrôle de l'ensemble de sa surface lors des opérations de contrôles d'exécution ou de réception.

4. LE TECTOPROOF CA

Dans le tunnel des Echelles, le support existant est une coque en béton projeté drainé. De très nombreuses fissures infiltrantes se sont activées au démarrage des travaux à la suite d'un printemps 2013 particulièrement pluvieux.

Les travaux préparatoires ont consisté à réaliser un décapage THP à 500 bars afin d'ôter les traces de pollution et toutes les parties de béton peu adhérentes. L'assèchement provisoire du support a été réalisé par des techniques de drainage et calfeutrement classiques : ouverture des fissures et étanchement au mortier d'étanchéité (« plug ») afin de canaliser les venues d'eau les évacuer temporairement par des drains de décharge (Fig. 5).

Un mortier a été réalisé par projection en voie mouillée pour lisser la rugosité du béton projeté et constituer un support imperméable durant l'application et la polymérisation du composite (Fig.5).



Fig. 5. Drains de décharge et mortier de régularisation et d'étanchement temporaire

Le composite TECTOPROOF CA a été réalisé manuellement par :

3. VERIFICATIONS

Each method is subjected to conventional or more specific tests which are not covered in this paper. For information on this subject, please refer to the acts of the 2014 World Tunnel Congress (Larive et al., 2014).

Only the TECTOPROOF CA method can be inspected fully over its surface during inspection operations for execution or acceptance.

4. TECTOPROOF CA

In the Echelles Tunnel, the existing surface is a drained sprayed concrete shell. The 2013 spring was exceptionally rainy and a large number of infiltrating cracks were activated when the work began.

The preparatory work consisted in conducting a high pressure blast cleaning (500 bars) to remove traces of pollution and all the parts of the concrete that were not very adherent. The temporary drying of the surface was carried out using conventional draining and sealing techniques: opening the cracks and sealing them with waterproofing mortar ("plug") in order to channel the inflows of water and drain them temporarily using discharge drains (figure 5).

Mortar was applied via wet process in order to smooth out the roughness of the concrete and to form a waterproof surface during the application and the polymerisation of the composite (figure 5).

Figure 5. Discharge drains and smoothing & temporary waterproofing mortar

The TECTOPROOF CA composite was carried out manually by:

- application au rouleau d'un primaire époxy pare-vapeur ETANPRIM SH tolérant le support humide puis saupoudrage de silice sèche pour s'affranchir du délai de recouvrement ;
 - application d'une couche de liant d'imprégnation époxy ETANPRIM SH (thixotropé pour une application verticale et en sous-face) et affichage d'un tissu de verre VP 45 marouflé ;
 - après 12 heures minimum, application au rouleau d'une couche de liant de saturation ETANPRIM SH époxy.
- using a roller to apply an ETANPRIM SH vapour barrier epoxy primer that tolerates a wet surface then dusting with dry silica to overcome the cover period;
 - applying a layer of ETANPRIM SH epoxy impregnation binder layer (thixotropic for vertical and underside application) and display of a marouflaged glass fabric VP 45;
 - after a minimum of 12 hours, using a roller to apply an ETANPRIM SH epoxy saturation binder coat.

Le contrôle des conditions d'ambiance est réalisé par thermo-hygromètre pour ne pas appliquer sur support condensant.

Checking the ambient conditions is carried out with a thermo-hygrometer in order to avoid application on a condensing surface.

Après polymérisation du composite (2 jours maximum), les drains sont obstrués par calfeutrements au mortier « plug » revêtus de patches d'étanchéité TECTOPROOF CA.

After polymerisation of the composite (max. 2 days), the drains are blocked off with "plug" mortar coated with patches of TECTOPROOF CA.



Fig. 6. Mise en œuvre du TECTOPROOF CA

Figure 6. Implementation of TECTOPROOF CA

La technique est « propre », aussi bien pour l'application du composite que du mortier de surfacage appliqué en voie humide. À ce titre, elle permet la circulation sur la voie contigüe pendant les travaux (Fig. 6). En revanche, elle ne s'accommode pas de la simultanéité d'autres travaux susceptibles de générer de grandes quantités de poussières entre les couches (projection de béton voie sèche par exemple).

The technique is "clean", for the application of the composite as well as for the surfacing mortar applied via wet process. As such, it allows for circulation on the adjacent lane during work (figure 6). On the other hand, it is inconvenient with other work at the same time that can generate large quantities of dust between the layers (spraying concrete via dry process, for example).

En conclusion, cette technique, déjà maîtrisée dans des applications en bâtiments, a présenté peu d'aléas en tunnels.

In conclusion, this technique, which is already mastered in applications for buildings, presented little hazards in tunnels

5. LE MASTERSEAL 345

Le support existant dans le tunnel des Échelles est constitué d'une coque en béton projeté drainée. Quelques fissures infiltrantes se sont activées au démarrage des travaux. Les travaux préparatoires sont identiques à ceux de la technique TECTOPROOF CA.

Outre l'imperméabilisation provisoire, l'enduit a également un rôle de lissage de la rugosité du béton projeté ; il facilite le contrôle des consommations et de l'épaisseur, et donc de l'uniformité de la polymérisation du produit d'étanchéité. Le Mastersal 345 a été projetée par voie sèche à raison de 3 kg/m² (Fig. 7).



Figure 7. Projection de MasterSeal 345 par voie sèche

Des fixations en acier inoxydable ont été réalisées à travers l'étanchéité jusqu'au rocher, à raison de 4u/m². Des patches de MasterSeal 345 ont été réalisés à la brosse autour et sur la cheville.

Le treillis soudé a été disposé avec des écarteurs et maintenu avec des pattes d'acier galvanisé serrées par boulonnage sur la cheville, assurant un effet anti-arrachement. Les plaques de treillis ont été disposées sans recouvrement de maille afin de garantir le non-effondrement en chaîne en cas d'arrachement par un poids-lourd (Fig. 8).

Le béton projeté d'épaisseur 5 cm a été réalisé par voie sèche en raison de la souplesse de la technique et de la longueur de projection dans l'ouvrage (100 m).

5. MASTERSEAL 345

The existing surface in the Echelles Tunnel is constituted of a drained sprayed concrete shell. A few infiltrating cracks were activated when the work began. The preparatory work is identical to that for the TECTOPROOF CA technique.

In addition to the temporary waterproofing, the coating also plays the role of smoothing out the roughness of the sprayed concrete; it facilitates the control of consumption and thickness, and therefore of the uniformity of the polymerisation of the membrane. The Masterseal 345 was sprayed by dry process at a rate of 3 kg/m² (figure 7).

Figure 7. Spraying of MasterSeal 345 by dry process

Stainless steel fasteners were implemented through the seal to the rock, at a rate of 4u/m². Patches of MasterSeal 345 were applied with a brush around and on the anchor.

The welded mesh was arranged with separators and maintained with galvanised steel brackets clamped with nuts and bolts on the anchor, providing an anti-snatching effect. The welded mesh was arranged without mesh overlapping in order to guarantee no chain collapse in the event it is pulled off by a lorry (figure 8).

The 5-cm thick sprayed concrete was applied using the dry method due to the flexibility of the technique and the length of spraying inside the tunnel (100 m).



Fig. 8. Procédé de maintien du treillis soudé

Figure 8. Method for maintaining the welded mesh

La technique de projection du béton par voie sèche génère des poussières et rebonds de béton lors de l'application. Les travaux ont donc été réalisés de nuit. L'utilisation d'un béton très accéléré a autorisé une remise en circulation le matin, après nettoyage de la chaussée.

The technique of spraying concrete with the dry method generates dust and bouncing concrete when applied. The work was therefore carried out at night. Using highly accelerated concrete allowed for traffic to resume in the morning, after the road surface was cleaned.

Après complet durcissement du béton, les drains ont été obstrués par des calfeutrements au mortier d'étanchéité revêtus de patches d'étanchéité.

After complete hardening of the concrete, the drains were blocked off with plug mortar coated with patches of sealant.

L'aléa principal a été le temps de polymérisation du Masterseal 345, beaucoup plus long que prévu (Dureté Shore A de seulement 36 à 48 h). Ceci a imposé de décaler les opérations de projection du béton de protection.

The main unknown was the polymerisation time for the MasterSeal 345, which was much longer than thought to be (Shore A hardness of only 36 at 48h). This required the concrete spraying operations to be shifted.

Durant le laps de temps durant lequel l'étanchéité a été soumise à des venues d'eau par l'arrière, une seule fuite localisée est apparue.

During the lapse of time during which the sealant was subjected to inflows of water from behind, only one localised leak appeared.

Une variabilité dans le temps de la dureté Shore a été observée, sans toutefois remettre en cause la possibilité de projeter le béton (dureté Shore A de 74 à 7 jours et 60 à 15j). Ceci impose d'effectuer une vérification de la dureté juste avant la projection.

A variability over time for the Shore hardness was observed, without however calling into question the possibility of spraying the concrete (Shore A hardness of 74 at 7 days and 60 at 15 days). This required the hardness to be checked just before spraying.

6. LE PROTHEANE AC/TI

6. PROTHeANE AC/TI

Le support dans le tunnel des Échelles est constitué du rocher brut. Après inspection par un géologue du CETU, le support a été purgé par rabotage et des boulons ont été réalisés sur les zones instables. Les plus grosses anfractuosités du rocher ont été bouchées par du béton projeté en voie sèche.

The surface in the Échelles Tunnel is constituted of raw rock. After inspection by a geologist from CETU, the surface was purged via planing and bolts were used on the unstable zones. The largest crevices in the rock were plugged with sprayed concrete using the dry method.

La nappe drainante a été posée transversalement et fixée provisoirement avec des chevilles plastiques. Les jonctions ont été scotchées dans un premier temps puis réalisées avec des bandes de pontage de 15 cm de largeur. Les fixations définitives en inox (diamètre 12 mm) ont été de type chevilles-chimiques dans la roche friable (en quelques points des piédroits) et chevilles à expansion dans la roche cohésive (cas très majoritaire et systématique en voute).

Des dispositifs spécifiques assurent l'étanchéité provisoire et la protection de la cheville avant la projection de résine. La résine d'étanchéité polyuréthane a été projetée à chaud en épaisseur de 2 mm mini avec une attention particulière portée sur les traversées. Dans certains cas, l'étanchéité des percements a été reprise au moyen d'une résine d'étanchéité extrudable à froid.

The draining sheet was installed transversally and temporarily attached with plastic anchors. The junctions were scotched in a first step then carried out with 15-cm wide batten strips. The final stainless steel fasteners (12 mm in diameter) were of the chemical anchor type in the crumbly rock (at a few locations of the sidewalls) and expansion anchors in the cohesive rock (most often the case and systematic on the dome).

Special devices provide for the temporary seal and protection of the anchor before the resin is sprayed. The polyurethane waterproofing resin was hot sprayed with a minimum thickness of 2 mm with special attention given to the piercing. In some cases, the sealing of the piercing was supplemented with a cold-extrudable sealing resin.



Fig.9. Coque PROTHEANE AC/TI en cours de ferrailage, avant projection du béton

Figure 9. PROTHEANE AC/TI shell during steel reinforcement, before spraying concrete

Le treillis soudé (à gauche de la Fig.9) a été disposé avec des écarteurs et maintenu avec des pattes d'acier galvanisé serrées par boulonnage sur la cheville (identiques à celles utilisées dans la zone de MasterSeal 345 - Figure 8). Les plaques de treillis ont été disposées sans recouvrement de maille afin de garantir le non-effondrement en chaîne en cas d'arrachement par un poids-lourd. Comme pour le MasterSeal 345, le béton projeté, d'épaisseur 5 cm, a été réalisé par voie sèche de nuit.

The welded steel mesh (on the left on figure 9) was arranged with separators and maintained with galvanised steel brackets clamped with nuts and bolts on the anchor (identical to those used in the MasterSeal 345 zone - Figure 8). The mesh plates were arranged without mesh overlapping in order to guarantee no chain collapse in the event it is pulled off by a lorry. As with MasterSeal 345, the sprayed concrete, 5 cm thick, was carried out using the dry method at night.

7. PREMIERS ENSEIGNEMENTS

De façon générale, à partir du moment où les drains de décharge ont été bouchés, on évitera tout percement ultérieur de l'étanchéité (suspentes de luminaires par exemple). En effet, cela impose l'intervention d'un personnel spécialisé pour en assurer l'étanchéité et elle est particulièrement difficile à obtenir en période d'écoulement d'eau.

7. PRELIMINARY RESULTS

Generally, from when the discharge drains were plugged, any later piercing of the waterproofing membrane is to be avoided (suspending lights, for example). Indeed, this requires the intervention of specialised personnel in order to restore the waterproofing and it is particularly difficult to obtain if there is running water.

Le point fort du procédé TECTOPROOF CA est sa très faible épaisseur ; il diminue très peu la section de l'ouvrage (3 mm à 3 cm suivant l'état initial du support).

Esthétiquement, il peut rester brut ou recevoir tout type de revêtement adhérent (peinture, enduit, carrelage). Ce choix doit être fait avant application car une finition sablée est alors nécessaire pour constituer une clé d'accrochage mécanique. En l'état, il bénéficie d'un classement vis-à-vis de la réaction au feu M1 (BS1d0).

Le choix possible d'armatures de nature (verre ou carbone) et de grammage différents permet d'adapter techniquement et économiquement le procédé à l'état de fissuration de l'ouvrage.

La mise en œuvre du procédé est manuelle et génère peu de déchets, ce qui autorise des interventions avec des moyens légers et le maintien de la circulation sur la voie contigüe pendant l'application, moyennant des protections assez légères (Fig. 10).



Fig.10. Mise en œuvre du TECTOPROOF CA sous fermeture d'une seule voie de circulation

Ce procédé permet également un contrôle de l'étanchéité au balai diélectrique sur toute la surface traitée, permettant de détecter, même en période sèche, les fuites potentielles. Leur réparation est par ailleurs très facile.

Pour bien fonctionner, le procédé TECTOPROOF CA exige une parfaite maîtrise des venues d'eau pendant l'application et durant la polymérisation (3 jours maxi).

Cette prestation exige un personnel compétent avec un savoir-faire particulier, utilisant notamment des techniques proches de celles mises en œuvre pour le cuvelage en sous-pression.

The advantage of the TECTOPROOF CA method is its low thickness; it hardly decreases the section of the structure (3 mm to 3 cm according to the initial condition of the surface).

From an aesthetic standpoint, it can remain as is or receive any type of adhering coating (paint, coating, tiling). This choice has to be made before application as a sanded finish is then required in order to constitute a mechanical latching function. As is, it benefits from a M1 rating with regards to reaction to fire (BS1d0).

The possible choice of various reinforcements in terms of type (glass- or carbon-fibre) and gram weights allows the method to be adapted technically and economically to the cracks state of the structure.

The method is implemented manually and does not generate much waste, which allows for interventions with limited resources and maintaining traffic on the adjacent lane during application, provided light protection is provided (figure 10).

Figure 10. Implementation of TECTOPROOF CA closing only one traffic lane

This method also allows the proper waterproofing to be tested with a dielectric brush over the entire surface treated, which makes it possible to detect potential leaks even in dry periods. Repairs are very easy.

In order to operate correctly, the TECTOPROOF CA method requires perfect control of the inflows of water during application and during polymerisation (max. 3 days).

Implementing the TECTOPROOF CA solution requires skilled personnel with highly specific know-how, similar to those used for the waterproofing of underground structures below the ground water table (car parks).

La qualité de la préparation du support est un point clé pour faciliter l'application ultérieure du tissu de renforcement. En particulier, sur support en béton projeté, il est souhaitable de l'aplanir au mieux avec l'enduit de surfacage. Il faut également porter une attention particulière à ce que l'enduit de surfacage, qui assure de plus le rôle d'imperméabilisation pendant la polymérisation du composite, ne faïence pas (retrait).

L'application de résines polymériques impose un contrôle des conditions d'application (température de l'air, du support et du point de rosée) (Fig. 11). Idéalement, les travaux doivent être envisagés hors période hivernale. Éventuellement, en fonction de la période des travaux, un traitement de l'air peut être prévu mais les difficultés liées au confinement des zones de travail doivent être prises en compte (surtout si la circulation doit être conservée).



Fig.11. Contrôle de températures

The quality of the preparation of the surface is a key point in facilitating the later application of the reinforcement fabric. In particular, on a sprayed concrete surface, it should be flattened out as much as possible with the surfacing coating. Special attention must also be given that the surfacing coating, which in addition provides the role of waterproofing during the polymerisation of the composite, does not crack (withdrawal).

Applying polymeric resins requires checking the application conditions (air temperature, surface temperature and dew point) (figure 11). Ideally, work should not be scheduled during the winter period. If needed, heating and dehumidification can be done but the difficulties linked to confining the work areas must be taken into account (especially if traffic is to be maintained in the tunnel during the works).

Figure 11. Temperatures measurement

Le point fort du MasterSeal 345 est sa projection relativement aisée pour des personnels rodés aux techniques de projection.

Pour bien fonctionner, le produit exige une parfaite maîtrise des venues d'eau en cours d'application et durant la polymérisation (jusqu'à 7 jours). Il peut s'accommoder d'un support « humide » mais non ruisselant.

La préparation du support exige un personnel compétent avec un savoir-faire particulier, utilisant, comme pour le procédé TECTOPROOF CA, des techniques proches de celles mises en œuvre pour le cuvelage en sous-pression.

Le temps de polymérisation du MasterSeal 345 est très variable et a atteint 7 jours dans les conditions de température de 12 à 20 °C au tunnel des Échelles ; l'hygrométrie était comprise entre 82 et 89%.

La non-obtention de la Dureté Shore (mini 50) empêche le recouvrement par le béton projeté afin de ne pas risquer de dégrader la membrane. Cette contrainte peut être pénalisante dans le cadre d'un

The advantage with MasterSeal 345 is that it is relatively easy to spray for personnel who are experienced in spraying techniques.

In order to operate correctly, the product requires perfect control of the inflows of water during application and during polymerisation (up to 7 days). A "wet" surface is tolerated but it cannot be streaming.

Preparing the surface requires skilled personnel with particular know-how, who, as with the TECTOPROOF CA method, use techniques that are close to those used for casing under negative pressure.

The polymerisation time for MasterSeal 345 varies greatly and reached 7 days in temperature conditions of 12 to 20 °C in the Échelles Tunnel, hygrometry varying between 82 to 89%.

Not obtaining the Shore Hardness (min. 50) prevents covering with sprayed concrete in order to prevent the risk of degrading the membrane. This constraint can be penalising in the framework

chantier avec des exigences de planning drastiques.

La condensation semble nuire à la polymérisation du MasterSeal 345 et faire varier sa dureté Shore dans le temps et dans l'espace (une zone où le produit n'a pas durci a été détectée en voûte sur (environ 50 x 50 cm²). Ce phénomène doit être étudié plus en détail, en particulier s'il s'agit d'une reprise d'eau du produit. Pour limiter l'influence des conditions d'ambiance (température, rosée), il conviendrait d'accélérer la polymérisation du produit.

La projection par voie sèche du MasterSeal 345 ne permet pas le contrôle de la quantité d'eau du mélange. S'agissant d'un produit réagissant avec l'eau, un dosage inapproprié en eau pourrait expliquer une variabilité du temps de polymérisation. Des solutions de mise en œuvre par voie mouillée permettraient de maîtriser le rapport eau/produit mais il convient d'adapter le matériel qui, jusqu'à présent, n'a pas donné satisfaction lors de précédents essais.

L'adhérence du béton projeté sur l'étanchéité n'a pas été prise en compte dans ce projet (Fig. 12). Le procédé « sandwich » étant appliqué sur une coque existante fissurée, l'entreprise n'a pas souhaité prendre le risque de détachement d'une galette de béton projeté en cas de poursuite de la fissuration du support. Pour cette raison, un treillis soudé ancré à raison de 4 fixations/m² a été mis en place.



Fig.12. Contrôle d'adhérence

La mesure de l'adhérence du « sandwich » au fil des années devrait faciliter sa prise en compte, permettant ainsi de supprimer ou limiter les ancrages dans la structure existante. Des caisses d'essais pour le contrôle à long terme ont été fabriquées à cet effet.

of a project with drastic scheduling requirements.

Condensation seems to harm the polymerisation of MasterSeal 345 and causes its Shore Hardness to vary over time and over space (a zone where the product did not harden was detected on the dome over about 50 x 50 cm²). This phenomenon must be examined in more detail, especially if it entails water uptake for the product. In order to limit the influence of the ambient conditions (temperature, dew point), the polymerisation of the product should be accelerated.

Spraying MasterSeal 345 using the dry method does not allow for controlling the quantity of water in the mixture. As this is a product that reacts with water, an unsuitable dosage of water could explain the variability in the polymerisation time. Solutions for implementation using the wet method would make it possible to control the water/product ratio but the equipment should be adapted as, until now, has not been satisfactory during the previous tests.

The adherence of the sprayed concrete on the seal was not taken into account in this project (figure 12). As the "sandwich" method is applied on an existing cracked shell, the company did not want to take the risk of dislodging a cake of sprayed concrete in the event the surface continues to crack. For this reason, an anchored welded trellis at a rate of 4 fasteners/m² was set up.

Figure 12. Adherence measurement

Measuring the adherence of the "sandwich" over the years should facilitate taking this into account, as such making it possible to suppress or limit anchorings in the existing structure. Test boxes for long-term control were made for this purpose.

Le point fort du procédé PROTHEANE AC/TI est sa capacité à être mise en œuvre même dans les tunnels avec de fortes venues d'eau et/ou les tunnels au rocher. En effet, les autres procédés imposent la réalisation préalable d'un béton support et une maîtrise des venues d'eau pendant la polymérisation ; ceci complique leur mise en œuvre et les pénalise économiquement.

La difficulté du procédé PROTHEANE AC/TI réside dans l'étanchement des traversées (au minimum au nombre de 4/m² pour assurer la fixation du treillis).

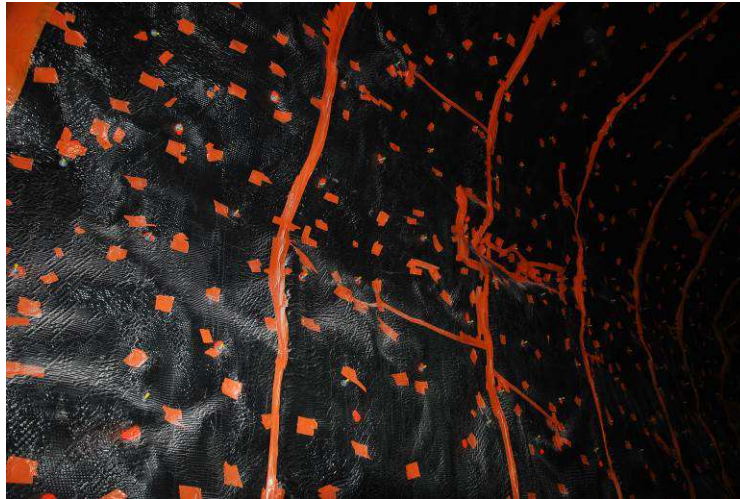


Fig.13. Densité actuelle des ancrages du procédé PROTHEANE AC/TI

Une première source d'évolution serait de parvenir à diminuer le nombre de traversées et les réaliser APRES projection de l'étanchéité, moyennant un étanchement a posteriori de chacune d'elles (ce qui serait finalement plus facile).

Pour cela, les perspectives résident dans :

- la justification mécanique d'une densité d'ancrage nettement inférieure mais suffisante pour la tenue de la coque ancrée ;
- l'adoption de béton fibré pour supprimer le treillis.

Par ailleurs, des essais d'adhérence du béton projeté sur la membrane en PROTHEANE AC/TI seront réalisés dans une zone où elle a été projetée en sandwich entre la coque existante et le béton projeté de protection. Si les mesures in situ sont satisfaisantes, l'adhérence devra également être qualifiée par des essais en laboratoire avant d'envisager sa prise en compte pour la tenue du béton projeté, comme pour le procédé MasterSeal 345. En fonction des résultats obtenus, des perspectives d'application de promoteurs d'adhérence sont envisageables.

The advantage of the PROTHEANE AC/TI method is its ability to be used even in tunnels with substantial water leakage and/or rock tunnels. Indeed, the other methods require a concrete surface to be created beforehand and control of the inflows of water during polymerisation; this complicates their use and penalises them from an economic standpoint.

The difficulty with the PROTHEANE AC/TI method resides in the proper waterproofing the piercings made in order to ensure the fastening of the steel mesh (at least 4/m²).

Figure 13. Current density of anchoring of PROTHEANE AC/TI method

Improvements could be achieved through the reduction of the number of piercing and by boring them AFTER the membrane has been sprayed, which would require the sealing of each piercing afterwards but would be easier.

For this, the perspectives reside in:

- mechanically justifying a reduced anchoring density that would still be sufficient for the resistance of the anchored shell;
- adopting fibre-reinforced concrete in order to suppress the steel mesh.

Moreover, adherence tests for the sprayed concrete on the PROTHEANE AC/TI membrane will be conducted in a zone where it was sprayed as a sandwich between the existing shell and the protective sprayed concrete. If the on-site measures are satisfactory, the adherence must also be tested in a laboratory before it can be taken into account for the resistance of the sprayed concrete, as with the MasterSeal 345 method. According to the results, perspectives for applying adhesion promoters could also be considered.

Une deuxième voie d'amélioration envisagée, en conservant le treillis soudé et la mise en place des fixations AVANT la projection de l'étanchéité, est d'adopter un système de fixation en deux parties :

- une première partie sans élément désaffleurant, permettant l'application d'un film continu d'étanchéité ;
- une deuxième partie disposée après application de l'étanchéité, permettant de fixer le treillis.

A second path for improvement, keeping the steel mesh and still installing the fasteners BEFORE spraying the waterproofing membrane, is to select a two parts fastening system:

- *a first part without non-flush elements, allowing to apply the membrane continuously;*
- *a second part arranged after application of the membrane and which would allow the steel mesh to be fastened.*

8. CONCLUSIONS

Les procédés TECTOPROOF CA et MasterSeal 345 sont utilisables en l'état pour d'autres projets, en prenant en compte le retour d'expérience acquis au Tunnel des Échelles.

Pour le procédé PROTHEANE AC/TI, le principe de la coque drainée fonctionne mais, pour optimiser la solution techniquement et économiquement, il est nécessaire de diminuer le nombre de traversées et de faciliter l'étanchement de chacune d'entre elles.

Une autre réalisation en vraie grandeur être réalisée pour permettre de valider ces améliorations potentielles.

8. CONCLUSIONS

The TECTOPROOF CA and MasterSeal 345 methods can be used as is for other projects, taking into account the feedback acquired at the Echelles Tunnel.

For the PROTHEANE AC/TI method, the principle of the drained shell works but, in order to optimise the solution from a technical and economic standpoint, the number of fasteners must be reduced and the sealing of each of them has to be facilitated.

Another full-scale experiment has to be run in order to validate these potential improvements.

9. REFERENCES

[1] Traitements d'arrêts d'eau dans les ouvrages souterrains, Recommandations du Groupe de travail n°9 animé par J-L.Mahuet, TOS 194-195, mars-juin 2006, pp. 161-203.

[2] Produits et procédé d'étanchéité innovant : système d'étanchéité liquide armé intrados – TECTOPROOF CA, Avis d'expert de l'AFTES GT9, Mahuet, J-L., Tunnels et Espace souterrain, juillet-août 2013, vol. 238, pp. 341-344.

9. REFERENCES

[1] *Recommendations related to waterproofing treatments in underground structures, Recommendations of the AFTES WG 9 headed by J-L. Mahuet, TOS 194-195, March-June 2006, pp. 161-203.*

[2] *Produits et procédé d'étanchéité innovant : système d'étanchéité liquide armé intrados – TECTOPROOF CA, Expert Agreement of AFTES WG9, Mahuet, J-L., Tunnels et Espace souterrain, July-August 2013, vol. 238, pp. 341-344.*

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les partenaires du projet ECOMINT, les maîtres d'ouvrages : ATMB (Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc) et RFF (Réseau Ferré de France), les fournisseurs : SPPM, BASF CC et T-Mix, ainsi que le personnel du Département Laboratoire du CETE de Lyon qui a assuré le contrôle extérieur.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the partners in the ECOMINT project: ATMB (Mont Blanc Motorway and Tunnel), RFF (French Railroad Network), SPPM, BASF CC and T-Mix, as well as the personnel of the Laboratory Department of CETE at Lyon who provided external controls.