

RETOURS D'EXPÉRIENCE SUR LA RÉPARATION DU GÉNIE CIVIL DE TUNNELS ROUTIERS



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

*RETOURS D'EXPÉRIENCE SUR
LA RÉPARATION DU GÉNIE CIVIL
DE TUNNELS ROUTIERS*

mars 2023

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69500 BRON – France

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	7
2 DÉMARCHE D'UNE OPÉRATION DE RÉPARATION	8
3 TRAITEMENT DES VENUES D'EAU	11
3.1 Contexte et spécificités des tunnels routiers	11
3.2 Idées-forces	11
3.3 Fréquence et type de désordres	12
3.4 Conséquences sur la maintenance, l'exploitation et le confort des usagers	12
3.5 Conséquences structurelles	13
3.6 Terminologie	14
3.7 Chantiers ayant fait l'objet d'un retour d'expérience	16
3.8 Fiches chantier	20
3.9 Analyse des fiches chantiers	80
3.9.1 Retours d'expérience sur les dispositifs de drainage	80
3.9.2 Retours d'expérience sur les procédés d'étanchement	84
3.9.3 Collecte des eaux drainées	87
3.10 Panorama des méthodes existantes	89
3.11 Principaux éléments de choix	91
3.11.1 Présélection des méthodes de réparation possibles	91
3.11.2 Critères de choix et pondération	92
4 MODIFICATION DU PROFIL EN TRAVERS	93
4.1 Éléments de choix de méthodes	93
4.2 Moyens d'exécution	93
4.2.1 Machines à attaque ponctuelle	94
4.2.2 Explosifs	95
4.3 Décaissement de chaussée	95
4.4 Alésage de l'intrados	96
4.4.1 Généralités	96
4.4.2 Cas des entrées en souterrain	97
4.5 Synoptique récapitulatif	98
5 TRAVAUX PRÉALABLES DE STABILISATION DE L'OUVRAGE	99
5.1 Purge	99
5.2 Travaux de soutènement pour les tunnels non revêtus	99
5.3 Travaux de soutènement pour les tunnels non revêtus	100
5.3.1 Bref rappel sur les maçonneries	100
5.3.2 Drainage	100
5.3.3 Travaux de sécurisation	101
5.4 Travaux préalables pour les tunnels en béton coffré	101
5.4.1 Ragréages et reprise d'armatures corrodées	101
5.4.2 Injections structurelles	102
5.5 Travaux préalables pour les tunnels en béton projeté	103
6 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	104
7 ANNEXES	106
7.1 Annexe 1 : Aide à la rédaction d'un programme fonctionnel de réparation de tunnel routier	106
7.2 Annexe 2 : Composition-type d'un dossier d'avant-projet de réparation	110
7.3 Annexe 3 : Présentation succincte du projet ECOMINT au tunnel des Échelles (73)	112

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : Tunnel des Monts (avant réparation) – Accès impossible aux postes d'appel d'urgence	12
Illustration 2 : Tunnel du Rond-Point (avant réparation) – Concrétions au droit d'un luminaire, infiltrations dans une niche de sécurité et coulures sur une caméra	12
Illustration 3 : Effets du gel sur des pierres, enduit décollé par le gel, pilier de béton armé gelé	13
Illustration 4 : Tunnel des Échelles – État du tunnel avant travaux – Pendant les travaux de 2013	18
Illustration 5 : Tunnel du Rond-Point – Joints drainés types Marquaires mis en place en 2010 (avant réparation)	18
Illustration 6 : Tunnel du Col de Menée – Saignée drainante avec traitement confortatif	81
Illustration 7 : Projection de béton sur bandes drainantes	81
Illustration 8 : Tunnel du col de Menée – Forage d'appel dans une saignée équipé d'un tube filtrant	81
Illustration 9 : Tunnel du Roux – Ancrage du treillis soudé d'une coque drainante	82
Illustration 10 : Tunnel du Chat – Tôles parapluie peintes en piédroit	83
Illustration 11 : Tunnel du Rousset – Injection de mousse PU en voûte	84
Illustration 12 : Coupe sur nouvelle fondation et travaux par plots alternés	85
Illustration 13 : Piédroits en béton projeté taloché au tunnel des Aravis	86
Illustration 14 : Tunnel de Rive-de-Gier – Application du tissu de fibres de verre d'un SEL-A	86
Illustration 15 : Tunnel du col de Rousset – Projection robotisée d'un SEPC	87
Illustration 16 : Exemple de drainage en base de piédroit dans le tunnel de Marquaires dans une zone de parement drainant (noter l'absence de trottoir dans cette zone, particularité liée à l'exiguïté du tunnel existant)	88
Illustration 17 : Exemple de coupe transversale d'un caniveau à graviers	88
Illustration 18 : Tunnel du Rond-Point – Démolition du revêtement à la fraiseuse	94
Illustration 19 : Vue détaillée d'une fraiseuse	94
Illustration 20 : Tunnel des Échelles – Alésage au BRH et vue détaillée d'un BRH	94
Illustration 21 : Effet d'un tir à l'explosif en tête de tunnel	95
Illustration 22 : Tunnel des Monts – Décaissement de la chaussée avant chemisage	95
Illustration 23 : Tunnel de Fort L'Écluse – Décaissement important par ½ chaussée	96
Illustration 24 : Tunnel de Cap Roux – Alésage au BRH localisé à l'angle du gabarit	96
Illustration 25 : Tunnel de la RD 926 – Alésage important de la section transversale	96
Illustration 26 : Tunnel de Rouaine – Sécurisation préalable des têtes	97
Illustration 27 : Tête amont avant travaux	97
Illustration 28 : Mise en place des tubes pétroliers sur le nouveau front	97
Illustration 29 : Nouvelle section alésée cintrée	97
Illustration 30 : Tête amont après travaux	97
Illustration 31 : Boulon à ancrage ponctuel	99
Illustration 32 : Reconstitution de maçonnerie par plots alternés	100
Illustration 33 : Tunnel de Tende – Mise sur cintres définitifs	101
Illustration 34 : Tunnel de Rive-de-Gier – Ragréage non adhérent sur armature corrodée (avant et après purge)	101
Illustration 35 : Schéma de principe d'une injection de clavage en voûte	103
Illustration 36 : Tunnel du Col de Menée – Injection de clavage	103
Illustration 37 : Chutes de béton projeté – À gauche : intertube du tunnel du Lioran ; à droite : tunnel de boulc (26)	103
Illustration 38 : Tunnel de Boulc – Boulonnage après purge profonde (même zone que l'illustration 35)	103
Illustration 39 : Tête du tunnel en mars 2013 : de petites stalactites de glace sont encore en train de fondre...	112
Illustration 40 : Principe du procédé adhérent TECTOPROOF CA	113
Illustration 41 : Principe du procédé « sandwich » MasterSeal 345	113
Illustration 42 : Principe de la coque ancrée PROTHEANE AC/TI	114



CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le CETU a toujours travaillé sur des opérations de réparation des tunnels routiers. Le présent document a pour **premier objectif** de rappeler la démarche globale d'une opération de réparation. Il complète en cela le *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers* du CETU pour les aspects liés au diagnostic de l'état de l'ouvrage et à l'élaboration d'un projet de réparation.

Le domaine d'application de ce document se limite aux **tunnels routiers creusés par méthode conventionnelle** (tunnels au rocher, tunnels revêtus de béton ou maçonneries).

Les travaux de réparation les plus courants en tunnels routiers sont des travaux de **traitement des venues d'eau**, car ces dernières sont à l'origine de nombreuses contraintes d'exploitation pour les gestionnaires d'ouvrage. Ces travaux constituent le **cœur du présent document**, qui rappelle certaines spécificités des ouvrages routiers par rapport aux tunnels canaux, ferroviaires ou de transports guidés, et explique pourquoi les exigences des gestionnaires routiers sont souvent particulièrement élevées.

Au fil des années, les techniques utilisées ont beaucoup évolué et le CETU a fortement contribué à leur amélioration. Le **deuxième objectif** de ce document est de ne pas perdre la trace de ces évolutions. Pour cela, un certain nombre de retours d'expérience ont été formalisés sous forme de « fiches chantier ». Un travail d'analyse est ensuite réalisé pour compléter la description de certaines techniques décrites

dans ces fiches chantier, et pour expliquer leurs intérêts et leurs limites, ainsi que les points de vigilance qui y sont associés. Ce travail s'appuie sur une définition précise de la terminologie employée.

Un **troisième objectif** est de présenter un panorama des méthodes de traitement des venues d'eau existantes et les principaux éléments de choix entre ces méthodes.

La démarche de capitalisation des retours d'expérience est ensuite élargie aux techniques de modifications du profil en travers et aux quelques techniques de réparation qui sont régulièrement mises en œuvre conjointement au traitement des venues d'eau. Le **quatrième objectif** est de donner des éléments de choix entre les techniques d'alésage et de décaissement de chaussées. Enfin, le **dernier objectif** est d'attirer l'attention sur certains aspects nécessitant une vigilance particulière.

Ce document d'information est destiné aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et gestionnaires. Il n'a pas la prétention d'être exhaustif et se focalise sur les méthodes évoquées ci-dessus. Il ne développe pas les techniques s'apparentant à la construction des ouvrages neufs, et ne traite pas des mises en conformité avec les réglementations relatives à la sécurité en tunnels, ni des réparations des éléments connexes aux tunnels (têtes, chaussées, équipements de génie civil, etc.), ni de la mise en peinture ou du recouvrement par des parements rapportés de type esthétique, acoustique ou protection passive contre l'incendie.

DÉMARCHE D'UNE OPÉRATION DE RÉPARATION

Quelle que soit la cause initiale ou l'ampleur des travaux à réaliser, la démarche d'élaboration du projet de réparation est identique dans ses grandes lignes. Les principales étapes de l'élaboration d'un projet de réparation en tunnel sont rappelées ci-après afin de mettre en avant les éléments essentiels qui participent à la réussite de ce projet.

Diagnostic

Tout projet de réparation du génie civil d'un tunnel doit débiter par une étude approfondie de l'état de santé de l'ouvrage avant d'aborder la mise au point de solutions techniques de réparation.

La qualité du diagnostic revêt une grande importance pour garantir l'adéquation de la réparation mise en œuvre au problème à traiter. Le diagnostic permet notamment de définir précisément l'objectif de la réparation à partir de données entrantes fiables.

Le diagnostic permet, si nécessaire, d'alerter le gestionnaire et de l'informer sur la nature et le degré d'urgence des travaux à entreprendre. Il peut conduire à la mise en œuvre de mesures de sécurité et/ou de sauvegarde à plus ou moins court terme (ex. fermeture de l'ouvrage, étaitements provisoires). Une adaptation du niveau de surveillance du génie civil de l'ouvrage peut également être requise jusqu'à l'aboutissement du projet de réparation (surveillance renforcée, haute surveillance).

Pour les tunnels revêtus, le diagnostic doit à la fois être géotechnique (au sens large) et structurel afin de tenir compte de l'interaction entre le terrain encaissant et le revêtement. La démarche générale de diagnostic se décline de la manière suivante :

- état des lieux des données du dossier d'ouvrage relatives à la construction et à la vie de l'ouvrage : géologie, hydrogéologie, géotechnique, conception et construction, caractéristiques du revêtement, travaux de réparation déjà réalisés, données issues du suivi du génie civil (ex. rapports d'inspection détaillée périodique, mesures de convergence, PV de contrôle annuel), etc. ;
- analyse croisée et synthétique des données précédemment évoquées ;
- si nécessaire, réalisation d'investigations complémentaires et/ou d'études par le calcul afin d'améliorer la connaissance de l'ouvrage et la compréhension du fonctionnement de la structure (revêtement + terrain encaissant) et/ou de la pathologie ;
- conclusion du diagnostic.

Programme fonctionnel

Le programme fonctionnel est mené sous la responsabilité du maître d'ouvrage (MOA) et doit être systématiquement formalisé par écrit. Le programme fonctionnel a pour but de présenter l'objectif principal de la réparation : motivation, type et périmètre des travaux. Il est réalisé sur la base des conclusions du diagnostic précédemment décrit. Il doit également intégrer l'ensemble des contraintes et des exigences complémentaires du MOA : délais de réalisation, conditions d'exploitation du tunnel pendant les travaux, enveloppe budgétaire, durée de vie attendue de la réparation, durée de vie attendue de la structure (revêtement existant et réparation), etc. Il est important d'associer l'exploitant de l'ouvrage dès l'élaboration de ce programme.

Le programme fonctionnel doit faire ressortir tous les besoins liés à l'usage futur de l'ouvrage, au-delà de la cause initiale qui motive les travaux. Son établissement est une étape essentielle afin d'assurer l'adéquation du projet de réparation à l'ensemble des besoins identifiés par le MOA. Il s'agit d'élargir la réflexion dans une perspective à moyen et long terme en tenant compte des contraintes d'exploitation et d'entretien, de l'évolution possible du trafic, des attentes des usagers, de la durabilité des matériaux et de la pérennité de la structure.

Les exigences et les performances attendues doivent être présentées dans le programme fonctionnel avec des indicateurs quantitatifs et mesurables permettant de contrôler l'atteinte des objectifs à la réception des travaux.

Un document support pour l'établissement du programme fonctionnel est proposé en annexe 1. Il est basé sur la recommandation T 1-94 du groupe permanent d'étude des marchés de travaux et de maîtrise d'œuvre (GPEM / TMO), publié en 1998 par la commission centrale des marchés, à l'attention des maîtres d'ouvrage.

Proposition de solutions répondant au mieux au programme établi

Pour chaque solution, le dossier précise les principales contraintes techniques, les délais de réalisation et les conditions d'exploitation possibles sous chantier et après travaux, etc. ; chacune des solutions est accompagnée des premiers éléments de coûts, sans oublier les coûts d'entretien induits (notion de coût « global »). Au cours de cette phase d'étude, un dialogue avec le MOA reste très utile pour cibler les solutions à retenir.

La définition d'un programme d'investigations complémentaires peut s'avérer nécessaire à la poursuite de l'étude de certaines solutions. L'annexe 7 du *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers* (livre 1) [CETU, 2015] présente les différentes méthodes classiquement utilisées pour les investigations complémentaires. Le choix se fait en fonction de la nature de l'ouvrage (tunnel au rocher ou revêtu) et en fonction des incertitudes à lever qui n'auraient pas été prises en compte à l'étape du diagnostic (propriétés mécaniques des matériaux, sous-épaisseurs du revêtement, confirmation de la présence ou de l'état des armatures, état de l'interface entre le rocher et le revêtement, profondeur des fondations et caractéristiques de l'encaissant, analyse chimique des eaux d'infiltration, etc.).

Avant-projet de réparation

Les études d'avant-projet ont pour objet :

- l'analyse des résultats des investigations complémentaires, le cas échéant, et la confirmation de la faisabilité des solutions proposées ;
- le choix de la solution retenue par le maître d'ouvrage et son étude détaillée ;
- la décision de réaliser le projet et d'en fixer le programme.

Les critères de choix les plus courants sont le coût, les délais, les conditions d'exploitation pendant les travaux, l'impact sur la maintenance ultérieure, l'environnement, l'esthétique de l'ouvrage et la pérennité de la solution en prenant en compte l'agressivité du site.

La solution retenue n'est pas nécessairement figée, des variantes peuvent être acceptées ultérieurement lors de la consultation des entreprises.

Un plan-type de dossier d'avant-projet de réparation (APROA) est proposé en annexe 2.

Le coût prévisionnel de l'opération précise les risques majeurs, le plus souvent liés à la stabilité de l'ouvrage, et leurs conséquences possibles sur les dépenses estimées. Il permet d'établir le forfait de rémunération du maître d'œuvre pour la poursuite des études, dans le cas d'une maîtrise d'œuvre privée.

L'APROA a vocation à être le dernier dossier avant établissement du DCE. Des compléments peuvent toutefois être nécessaires et des études complémentaires éventuelles peuvent être apportées :

- précisions techniques ou organisationnelles ;
- décomposition plus détaillée des coûts et délais ;
- analyse plus fine des risques liés aux différentes phases de réalisation des travaux.

Dossier de consultation des entreprises, consultation, passation du marché

La procédure de passation des marchés doit être adaptée au coût et à la complexité des travaux. Les conditions de présentation de variantes doivent être précisées, qu'elles soient facultatives ou obligatoires, ainsi que les exigences minimales qu'elles doivent respecter. Les maîtres d'ouvrage publics sont soumis au Code de la commande Publique qui encadre les choix quant aux procédures applicables.

Il est également rappelé que le nouveau Fascicule 69 du CCTG relatif aux travaux en souterrain qui couvre également les opérations de réhabilitation, est applicable depuis le 1^{er} juillet 2012. Son application est recommandée par le CETU. Son guide d'application est téléchargeable sur le site internet du CETU (cf. § 6. Documents de Référence).

Réalisation des travaux de réparation

Elle est confiée à l'entreprise sélectionnée et ses éventuels sous-traitants. Elle fait l'objet des contrôles réalisés suivant le plan qualité de l'entreprise et de ceux missionnés par le maître d'ouvrage à son contrôle extérieur. Une attention particulière doit être portée à la surveillance et l'auscultation de l'ouvrage si les travaux réalisés risquent de déstabiliser tout ou partie de celui-ci.

Réception des travaux et dossier d'ouvrage

La réception des travaux est assurée par le maître d'ouvrage, assisté de son maître d'œuvre. À ce stade, il est important de mettre à jour le dossier d'ouvrage avec les données relatives à l'opération de réparation mise en œuvre, d'évaluer le nouvel état de l'ouvrage et de définir un programme de surveillance adapté à ce nouvel état. L'évaluation du nouvel état de l'ouvrage nécessite la réalisation d'une inspection détaillée initiale permettant d'établir un nouvel état de référence pour les inspections détaillées périodiques futures. Cette inspection doit particulièrement relever l'état des éléments faisant l'objet d'une garantie particulière (notamment en termes d'étanchement).

Pour les ouvrages du réseau routier national, l'**instruction du Gouvernement du 29 avril 2014** fixe les modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion. Les instructions techniques annexées à cette instruction gouvernementale ont évolué, les dernières en vigueur sont : l'instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le RRN, version du 20 novembre 2019 et l'instruction technique relative au système de management de la qualité dans les services routiers, version du 28 février 2017.

Les différentes étapes décrites ci-dessus rentrent dans le cadre des opérations de gestion. Elles sont placées sous la responsabilité du maître d'ouvrage.

Externalisation de la maîtrise d'œuvre

Conformément au Livre IV de la deuxième partie du Code de Commande Publique (articles L.2410 et suivants, articles R.2410 et suivants et annexe 20) remplaçant la loi « MOP », ce dernier peut confier à une maîtrise d'œuvre privée tout ou partie des missions de conception et d'assistance suivantes, transposées aux opérations de réparation du génie civil d'un tunnel :

- les études de diagnostic (DIA) ;
- les études d'avant-projet de réparation (APROA) ;
- l'assistance apportée au maître de l'ouvrage pour la passation du contrat de travaux (ACT) ;
- l'examen de la conformité au projet et le visa des études d'exécution¹ (VISA) ;
- la direction de l'exécution du contrat de travaux (DET) ;
- l'ordonnancement, le pilotage et la coordination du chantier (OPC) ;
- l'assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des opérations de réception et pendant la période de garantie de parfait achèvement (AOR).

Ces missions sont parfois confiées à des maîtres d'œuvre successifs. Cependant, pour réduire les délais d'appropriation des études précédentes et le risque de déresponsabilisation, il est vivement recommandé de confier à un seul et même maître d'œuvre l'ensemble des études dès l'APROA.

Nota bene : sous réserve d'apporter les adaptations spécifiques à chaque projet de travaux en tunnel, la démarche générale précédemment présentée peut s'appliquer aux autres cas suivants :

- mise en conformité du tunnel avec la réglementation sur la sécurité des tunnels de plus de 300 m (non traitée dans ce document) ;
- évolution du trafic nécessitant une modification de la section du tunnel (largeur roulable et gabarit) ;
- souhait du maître d'ouvrage d'augmenter le niveau de service de l'ouvrage (mise en place de parements en piédroits, ajouts d'équipements nécessitant des modifications du génie civil, etc.).

1. Les études d'exécution (phase EXE) sont généralement réalisées par l'entrepreneur de travaux.

TRAITEMENT DES VENUES D'EAU

3.1 CONTEXTE ET SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS ROUTIERS

Depuis le début des années 80, un dispositif d'étanchéité par géomembrane synthétique (DEG-S) est systématiquement mis en œuvre à l'extrados des tunnels routiers avec revêtement en béton. Les tunnels plus anciens ne sont pas étanchés et c'est la raison pour laquelle le traitement des venues d'eau fait partie des réparations les plus courantes en tunnels.

Depuis de nombreuses années, le Groupe de Travail n°9 de l'AFTES, en charge de l'étanchement et du drainage dans les ouvrages souterrains, est très productif sur cette problématique. Les recommandations initiales de ce groupe, parues dans le TOS n°194-195 en 2006, ne traitaient pas de façon totalement satisfaisante des spécificités des tunnels routiers. La refonte totale de ces recommandations (5), publiée en octobre 2016 dans le TES n° 257, prend maintenant bien en compte ces particularités, à savoir :

- le risque de chocs liés au trafic poids-lourds (hors-gabarit, chargement trop encombrants, bâches flottantes, etc.), qui milite pour des traitements ne présentant aucune saillie dans l'emprise de la circulation ;
- le risque de perte de contrôle de la trajectoire, qui augmente la dangerosité du verglas et des arrivées d'eau importantes ou des dépôts de calcite dans les parties circulées ;
- la présence d'agents d'exploitation ou d'usagers pas ou peu protégés, qui pourraient être blessés par des chutes de stalactites de glace ;
- la présence croissante de nombreux équipements électriques sensibles aux venues d'eau.

Le CETU a largement contribué à la mise à jour des recommandations du GT9, qui intègrent désormais :

- l'ensemble des techniques existantes à ce jour ;
- l'évolution des textes réglementaires (Fascicule 67 titre III du CCTG, normes NF EN 1504-5 et NF P95-103) ;
- les dispositions préconisées par le CETU sur les exigences de tenue au feu des procédés de traitement des venues d'eau dans les projets de réparation (note d'information n°25 du CETU) ;
- les nouveaux référentiels pour l'obtention d'Avis Techniques CETU² ;
- l'apparition sur le marché de systèmes innovants couverts par des Évaluations AFTES³.

De ce fait, le présent document n'a pas vocation à répéter ces recommandations : il leur apporte des compléments, essentiellement basés sur des retours d'expérience de chantiers mettant en œuvre des procédés, pour certains très anciens et obsolètes (comme les coques de drainage par plaque de type « Ethafoam »), pour d'autres innovants et « incontournables » à une époque mais pour lesquels il existe maintenant des alternatives possibles (comme les coques indépendantes), pour d'autres encore plus novateurs (comme les étanchéités projetées confinées, expérimentées pour la 1^{re} fois en France par le CETU en 2008, ou les SEL-A mis en œuvre en tunnel routier dans un ouvrage du Département de la Savoie pour la première fois en 2013 sous l'impulsion du CETU et des programmes d'innovation du Ministère).

3.2 IDÉES-FORCES

La première idée-force qui ressort de l'analyse des retours d'expérience présentés ci-après est l'intérêt d'un maître d'ouvrage à privilégier l'obtention d'un étanchement total (cf. § 3.6 Terminologie), résistant aux chocs et à l'arrachement. Cette position, qui peut paraître « luxueuse » en première approche, s'avère souvent nécessaire pour ne pas voir réapparaître rapidement les problèmes initiaux, notamment en termes de conséquences sur l'exploitation (tournées de surveillance et de bris des stalactites) et la sécurité (plaques de verglas, peut-être moins nombreuses mais tout aussi dangereuses). Un investissement plus faible au moment des travaux risque de conduire à un coût global plus élevé à terme, car des compléments de travaux doivent souvent intervenir sans tarder (et provoquer à nouveau une gêne à l'utilisateur).

Une autre idée-force est l'absolue nécessité de traiter les venues d'eau avant toute rénovation, changement ou installation de nouveaux équipements électriques ou de gestion en tunnels. Les projets liés à des problématiques d'équipements sont trop souvent conduits par des personnes n'ayant pas une connaissance et une sensibilité suffisantes vis-à-vis des enjeux du génie civil et de l'étanchement.

Au-delà de ces messages fondamentaux, ce document propose également une réflexion plus générale sur le choix d'une « stratégie de traitement des venues d'eau » ; cet aspect n'est pas abordé dans les recommandations actuelles du GT9 de l'AFTES.

2. Voir Terminologie.

3. Voir Terminologie.

3.3 FRÉQUENCE ET TYPE DE DÉSORDRES

Les tunnels font l'objet d'inspections depuis le milieu des années 70 dans le cadre d'une démarche globale de surveillance, suivant le document technique spécifique aux tunnels routiers de l'État depuis 1979 : le Fascicule 40 de l'ITSEOA⁴, révisé en 2012.

La notion de cotation suivant le principe de l'IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) est appliquée aux tunnels du réseau routier national non concédés depuis 1995. Très vite, il est apparu nécessaire d'évaluer l'état des ouvrages selon deux angles distincts, faisant chacun l'objet d'une cotation spécifique. Ainsi, il existe une note « Génie civil » et une note « Eau ». Pour ces deux notes, il existe trois niveaux, du meilleur (1) au plus mauvais (3) et des mentions S et U, peuvent être adjointes pour traduire des problèmes de sécurité (S) ou des problèmes à traiter en urgence (U).

Sur la base des notations IQOA en fin d'année 2005 – avant transfert de nombreux tunnels aux collectivités territoriales – moins de 56 % des tunnels routiers du réseau alors national

avaient une note 1 pour le critère « Eau », mais près de 44 % avaient une note 2, signifiant que les venues d'eau constituaient une gêne spécifique ou pouvaient entraîner à long terme une aggravation des désordres affectant les structures. Dans 3 % des cas, la note 2 était suivie de la mention S, ce qui dénotait des problématiques sérieuses alors même que de nombreux travaux d'amélioration avaient déjà été faits pour pallier ces problèmes d'étanchéité...

Depuis ce transfert, le patrimoine des tunnels routiers de l'État est nettement plus réduit (moins de 30 km) et ses ouvrages – relativement récents et construits pour beaucoup avec une étanchéité extradossée – ne sont plus représentatifs des différents types de construction (béton, maçonnerie, rocher, etc.) que l'on peut trouver sur l'ensemble du réseau routier. S'il est donc difficile d'avoir aujourd'hui une vision globale de l'état du patrimoine des tunnels français, on peut cependant affirmer que les venues d'eau ont toujours été, et restent encore, une source importante de désordres et de difficultés d'exploitation dans les tunnels routiers.

3.4 CONSÉQUENCES SUR LA MAINTENANCE, L'EXPLOITATION ET LE CONFORT DES USAGERS

Les difficultés d'exploitation dues aux venues d'eaux sont surtout sensibles en hiver, en raison des risques liés au verglas et aux stalactites de glace. Cependant, même en été, en période orageuse, on peut rencontrer dans certains tunnels des venues d'eau très fortes, de type « geyser » qui peuvent surprendre l'usager, risquant de lui faire quitter sa trajectoire et percuter d'autres véhicules.

Lors d'épisodes froids durables, l'accès des postes de secours peut même être empêché, comme dans l'illustration 1 ci-contre.

*Illustration 1 : Tunnel des Monts (avant réparation)
Accès impossible aux postes d'appel d'urgence*



On rappelle également que, en toutes saisons, la présence d'eau est à l'origine de la corrosion de certains équipements et de leurs supports (et parfois de courts-circuits). Elle est préjudiciable à la pérennité des équipements (accélérateurs, chemins de câbles, luminaires, caméras, capteurs de pollution, etc.) et à la sécurité des usagers (corrosion des ancrages et risque de chutes d'équipements) ; elle gêne l'exploitant et les usagers du fait des pannes qu'elle occasionne et de la diminution de la durée de vie des équipements (cf. Illustration 2).

Des problèmes d'humidité dans les locaux techniques, ainsi que des problèmes d'odeur ou « esthétiques » ont également été rencontrés dans des locaux pouvant recevoir du public (niches et issues de secours).



Illustration 2 : Tunnel du Rond-Point (avant réparation) – Concrétions au droit d'un luminaire (à gauche), infiltrations dans une niche de sécurité (au milieu) et coulures sur une caméra (à droite)

4. Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art mise à jour et publiée par la circulaire du 16 février 2011 du Ministère de l'Écologie, de développement durable, des transports et du logement.

3.5 CONSÉQUENCES STRUCTURELLES

Comme l'indique le *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers* du CETU, l'eau est un vecteur important de désordres des matériaux ou de la structure d'un ouvrage. Suivant sa composition physico-chimique, elle peut engendrer des attaques chimiques, par dissolution (lessivage), création de concrétions ou d'efflorescences calcaires ou sulfatées. Elle peut être la cause de décollements ou de chutes d'éléments de revêtement sur la chaussée.

En période de gel, et plus encore lors des épisodes cycliques de gel-dégel, l'eau a une action très délétère sur les matériaux : joints des maçonneries, pierres ou briques, mortiers ou bétons, enduits... Elle peut générer un écaillage superficiel ou un gel interne conduisant à une détérioration importante.

Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter le *Guide de l'inspection* du CETU, téléchargeable sur son site Internet.



Illustration 3 : Effets du gel sur des pierres, enduit décollé par le gel, pilier de béton armé gelé

3.6 TERMINOLOGIE

La terminologie employée pour le traitement des venues d'eau, quoique précise et rigoureuse, peut parfois être non intuitive, voire déroutante. À titre d'exemple, on remarquera dans les définitions qui suivent que certains procédés d'étanchement n'empêchent pas l'eau de pénétrer dans l'ouvrage : ainsi, les procédés d'imperméabilisation et les dispositifs ou coques de drainage ne prétendent pas à une étanchéité « totale », au sens défini ci-dessous.

Cette terminologie complète, pour les projets de réparation, celle proposée par le Fascicule 67 titre III qui s'applique aux ouvrages neufs, mais dont une grande partie est également utile pour les projets de réparation.

Termes généraux	Définition
Évaluation AFTES (ex Avis d'experts)	<p>Document d'appréciation et d'information, à l'attention des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage, qui donne une opinion sur l'adéquation d'un procédé innovant d'étanchéité ou de drainage avec le domaine d'emploi revendiqué par le fabricant.</p> <p>Cet avis est émis par l'AFTES pour une durée de 5 ans, sur demande du fabricant et après instruction d'un dossier technique par une commission d'experts représentatifs de la profession, examen d'un chantier-test et, le cas échéant, du retour d'expérience concernant le procédé.</p>
Avis technique CETU	<p>Document destiné aux divers intervenants dans l'acte de construire un ouvrage souterrain, validant la conformité d'un ensemble de produits à un référentiel technique. Il concerne les procédés d'étanchéité courants définis dans le Fascicule 67 titre III du CTG version 2018 ou devenus courants après sa publication. Il permet d'évaluer la performance et la durabilité du procédé sur la base de référentiels techniques préétablis et régulièrement mis à jour.</p> <p>Cet avis est publié par le CETU, après instruction d'un dossier technique par la commission constituée d'experts désignés et représentatifs de la profession. Il a une durée de validité de 5 ans.</p>
Chemisage	<p>Procédé de réparation désignant un revêtement structural en béton coffré, armé ou non, protégeant un écran d'étanchéité de type DEG-S (cf définition ci-après). Ce procédé d'étanchement est associé à sa base à un système longitudinal d'évacuation des eaux drainées.</p>
Compartimentage	<p>Se reporter à DEG-S.</p>
Coque de drainage ou coque drainante	<p>Procédé continu rigide par sa forme ou par la nature de ses constituants. Les coques drainantes peuvent être de deux types, constituées de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • tôles-parapluies métalliques ; • un géosynthétique de drainage et un revêtement mince en béton projeté armé. En fonction de son épaisseur, la coque est ancrée au support (épaisseur environ 5 cm) ou autoportante. <p>Ces coques sont associées à leur base à un système longitudinal d'évacuation des eaux.</p>
Coque d'étanchéité	<p>Procédé continu rigide par sa forme ou par la nature de ses constituants. Il peut s'agir de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • coque indépendante, constituée par un revêtement autoportant en béton projeté armé (ép. < 25 cm) et d'un écran d'étanchéité, généralement un DEG-S (Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane Synthétique) ; • coque ancrée, constituée d'un revêtement mince, en béton projeté armé et ancré au support (ép. environ 5 à 7 cm) protégeant un écran d'étanchéité, tel que les Systèmes d'Étanchéité Projetée Confinée (SEPC) ou les résines de type polyuréthane projetées à chaud. <p>Ces coques sont associées à leur base à un système longitudinal d'évacuation des eaux.</p>
DEG-S (Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane Synthétique)	<p>Procédé d'étanchéité indépendant associant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un géotextile anti-poinçonnement de protection inférieure ; • une géomembrane d'étanchéité translucide en PVC-P d'épaisseur minimale 2 mm ; • une membrane synthétique en PVC d'épaisseur minimale 1,9 mm pour protection supérieure ; • des rondelles PVC de fixation et/ou des tôles colaminées compatibles avec la géomembrane ; • des profilés de compartimentage soudés à la géomembrane, destinés à localiser les éventuelles injections d'arrêt d'eau qui pourraient s'avérer nécessaires en cas de fuites ultérieures ; • des dispositifs d'injection des compartimentages. <p>Le procédé est placé à l'extrados du revêtement auto-portant structural (généralement en béton coffré d'ép. > 25 cm ou coque indépendante auto-portante).</p> <p>Les DEG-S sont couverts par les Avis Techniques CETU.</p>

Termes généraux	Définition
Dispositif de drainage	Système défini par des procédures et des produits permettant de réaliser le drainage de l'ouvrage (cf. ci-dessous). En réparation, le drainage d'un ouvrage existant peut se décliner en : <ul style="list-style-type: none"> • traitement surfacique (ex : drainage d'une zone d'infiltrations par tôle parapluie ou géosynthétique de drainage recouvert de béton projeté) ; • traitement linéaire (ex : drainage des joints ou de fissures importantes, associé à un traitement confortatif).
Drainage	Action qui consiste, par l'emploi de dispositifs de drainage linéaire ou surfacique, à faciliter la circulation et l'évacuation de l'eau d'infiltration vers l'extérieur de l'ouvrage. Le drainage peut être provisoire, pour permettre par exemple la mise en place dans de bonnes conditions d'un procédé d'étanchéité, ou définitif permettant ainsi de limiter la montée en charge de l'eau d'infiltration sur la structure de l'ouvrage. Les ouvrages sous pression hydrostatique permanente ne peuvent pas être drainés.
Étanchement	Action qui consiste, par l'emploi de procédés d'étanchéité ponctuel ou surfacique, à empêcher ou limiter les infiltrations d'eau dans un ouvrage.
Étanchement total / relatif	Il s'agit du niveau d'étanchéité à atteindre (fixé par le MOA) : <ul style="list-style-type: none"> • <u>total</u> : sans aucun débit de fuite résiduel ; • <u>relatif</u> : avec un débit de fuite admissible, défini en se basant sur le tableau 1 des recommandations GT9R1F3 (TES n°257) ou sur la notation Eau de la cotation IQOA).
Étanchement (ou drainage) complet / partiel	Il s'agit de l'étendue des zones à traiter (fixée par le MOA) : <ul style="list-style-type: none"> • <u>complet</u> (ou généralisé) : application du traitement sur tout l'ouvrage ; • <u>partiel</u> (ou surfacique) : application du traitement sur certaines zones de l'ouvrage (longitudinalement et/ou transversalement).
Procédés d'étanchéité	Systèmes définis par des procédures et des produits permettant de réaliser l'étanchement de l'ouvrage. En réparation, par analogie au Fascicule 67 titre III du CCTG (travaux neufs), l'étanchement d'un ouvrage existant peut se décliner selon deux types ⁵ de procédés d'étanchement :
<u>Écran d'étanchéité</u>	<ul style="list-style-type: none"> • par <u>écran d'étanchéité</u> : réalisation d'une barrière empêchant toute intrusion de l'eau, mise en œuvre soit à l'extrados d'une coque ou d'un chemisage, soit dans l'épaisseur d'un revêtement existant (ex : injection ou calfeutrement associés⁶ à un traitement confortatif), soit à l'intrados d'un revêtement existant. On parle aussi de procédés d'arrêt d'eau. • par <u>impermeabilisation</u> : emploi de produits hydrofuges, de type mortiers ou résines, adhérents au support, mis en œuvre à l'intrados de l'ouvrage mais ne résistant pas à une fissuration « appréciable » du support, au sens du Fascicule 67 titre III.
<u>Impermeabilisation</u>	
SEPC (Système d'Étanchéité Projetée Confinée)	Procédé d'étanchéité adhérent associant : <ul style="list-style-type: none"> • une membrane d'étanchéité projetée, constituée principalement de résines copolymères ; • une couche de béton coulé ou projeté assurant le confinement pour résister à la contre-pression d'eau et protéger la membrane contre les agressions extérieures. Le confinement peut être constitué par : <ul style="list-style-type: none"> • le béton structural, on parle alors de SEPC extrados ; • une coque autoportante, on parle alors de SEPC intrados-auto ; • une coque mince ancrée, on parle alors de SEPC intrados-ancré. Les SEPC sont actuellement couverts par des Évaluations AFTES.
SEL-A (Système d'Étanchéité Liquide Armé)	Procédé d'étanchéité adhérent constitué d'un film de résine (généralement à base d'époxy) renforcé par une armature (par exemple en fibre de verre ou de carbone). Le procédé est placé en intrados et résiste aux contre-pressions hydrostatiques sans exiger de couche de confinement. Les SEL-A sont actuellement couverts par des Évaluations AFTES.
SIL (Système d'Impermeabilisation Liquide)	Procédé d'impermeabilisation adhérent constitué d'un film de résine (généralement à base d'époxy). À l'inverse des SEL-A, il n'est pas armé d'un tissu de fibres et ne résiste pas à une fissuration appréciable du support. Les SIL sont couverts par les Avis Techniques CETU.
Traitement confortatif	Procédé permettant de pérenniser l'étanchement d'un défaut localisé (pré-étanchement réalisé par injection, calfeutrement ou drainage linéaire) et d'augmenter son efficacité, sa pérennité et sa durée de garantie particulière. On distingue le traitement confortatif simple par pontage (application sur la zone réparée avec débordement de 5 cm minimum) du traitement confortatif par retour technique (application de part et d'autre de la zone réparée de 50 cm à 1 m). Pour une efficacité maximale, il est souvent préférable de cumuler les deux procédés.

5. En travaux neufs, le Fascicule 67 III définit un 3^e type de procédé : les structures relativement étanches (élément béton dont les joints sont traités ; exemple des parois moulées, des voussoirs, etc.). Ce type de procédé n'est pas utilisé en réparation.

6. Les traitements des fissures par injection ou calfeutrement seuls (sans traitement confortatif) ne rentrent pas dans cette catégorie. Ils ne constituent qu'un traitement de pré-étanchement du support avant la mise en œuvre du procédé d'étanchéité proprement dit.

3.7 CHANTIERS AYANT FAIT L'OBJET D'UN RETOUR D'EXPÉRIENCE

Pour chacun des chantiers d'étanchement et/ou de drainage retenus, le tableau suivant décrit brièvement le contenu des « fiches chantier », qui présentent l'ensemble des réparations

exécutées et mettent en évidence les étapes sensibles relatives aux traitements d'arrêt d'eau (en gras).

Fiche chantier	Travaux préalables	Traitement des venues d'eau		Principales étapes de réalisation (en gras les plus sensibles)
		Drainage par	Étanchement par	
1. Tunnel du Grand Clôt Travaux en 1989 Longueur au rocher traitée : 62 m	Alésage à la machine à attaque ponctuelle + Soutènement par béton projeté	Coque ancrée : Plaques Ethafoam ⁷ + Revêtement en béton projeté armé		<ul style="list-style-type: none"> • Traitement d'étanchéité des passages des tiges d'ancrage de la coque • Soudage des plaques • Traitement des points de fixation des plaques • Pose du treillis soudé • Projection du béton
2. Tunnel des Échelles Travaux en 1993 Surface au rocher traitée : 2 500 m ²	Alésage à la machine à attaque ponctuelle + Soutènement par boulons et béton projeté	Coque ancrée : Plaques Ethafoam + Revêtement en béton projeté armé		<ul style="list-style-type: none"> • Traitement d'étanchéité des passages des tiges d'ancrage de la coque • Soudage des plaques • Traitement des points de fixation des plaques • Pose du treillis soudé • Projection du béton
3. Tunnel du Resquiadou Travaux en 1994 Longueur au rocher traitée : 142 m Longueur revêtue traitée : 35 m	Alésage à la machine à attaque ponctuelle + Soutènement par boulons et béton projeté	Saignées drainantes (drainage linéaire)	Coque indépendante : DEG-S sur ossature + Revêtement en béton projeté armé	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des piédroits supportant l'ossature • Construction et mise en place de l'ossature • Raccordement du DEG-S sur l'étanchéité en attente • Projection du béton
4. Tunnel du Rond-Point Travaux en 1995 Longueur de joints traitée : 3 450 m Longueur de fissures traitée : 1 000 m		Saignées drainantes avec profilé encastré (PRT ⁸) au niveau des joints de bétonnage (drainage linéaire)	Injections d'arrêt d'eau (sans traitement confortatif)	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation par sciage de la saignée • Réalisation des forages d'appel • Mise en place du profil encastré
5. Tunnel du Grand Chambon Travaux en 1998 Longueur au rocher traitée : 220 m	Alésage à la machine à attaque ponctuelle	Tôles parapluie ancrées (drainage surfacique)		<ul style="list-style-type: none"> • Boulonnage pour fixation des cintres et lisses • Fixation des tôles parapluies sur les lisses
6. Tunnel de Montcenis Travaux en 1999 Longueur de joints traitée : 380 m		Saignées drainantes avec profilé encastré (PRT) au niveau des joints de bétonnage (drainage linéaire)		<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation par sciage de la saignée • Réalisation des forages d'appel • Mise en place du profil encastré
7. Tunnel de la Giettaz (ancien tunnel des Aravis) Travaux en 2001 Longueur au rocher traitée : 52 m	Soutènement par boulons, treillis soudé et béton projeté		Coque indépendante : DEG-S sur ossature + Revêtement en béton projeté armé	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des piédroits de pose de l'ossature. • Construction et mise en place de l'ossature • Raccordement du DEG-S sur l'étanchéité en attente • Projection du béton

7. Le dispositif de drainage « Ethafoam » était constitué de plaques de mousse à cellules fermées. Ce procédé n'est actuellement plus commercialisé.

8. © Entreprise Phoenix.

Fiche chantier	Travaux préalables	Traitement des venues d'eau		Principales étapes de réalisation (en gras les plus sensibles)
		Drainage par	Étanchement par	
8. Tunnel de Sisteron Travaux en 2003 Longueur revêtue traitée : 162 m			Coque indépendante : DEG-S sur ossature + Revêtement en béton projeté armé	<ul style="list-style-type: none"> • Fixation des corbeaux préfabriqués par boulonnage • Construction et mise en place de l'ossature • Raccordement du DEG-S sur l'étanchéité en attente • Projection du béton
9. Tunnel du Marquaires Travaux en 2003 Longueur maçonnée traitée : 325 m	Décassement de la chaussée à la machine à attaque ponctuelle		Chemisage : DEG-S + Revêtement en béton coffré	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des piédroits de pose du chemisage • Mise en place de l'outil coffrant • Clavage de la clé de voûte
10. Tunnel du Marquaires Travaux en 2006 Longueur de joints traitée : 95 m Surface de piédroit drainée : 295 m ²		Géospaceur isolé Couverture en tôles ancrées (drainage surfacique)		<ul style="list-style-type: none"> • Pose du Delta MS • Pose de la mousse réticulée • Raccordement au drain en bas de piédroit • Fixation des tôles inox et étanchement des fixations traversantes
		Saignées drainantes avec ½ coquille calfeutrée au niveau des joints de bétonnage (drainage linéaire)		<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation par sciage de la saignée • Réalisation des forages d'appel • Mise en place de la ½ coquille • Calfeutrement des saignées au mortier
11. Tunnel de la RD926 (« Grand tunnel ») Travaux en 2006 Longueur au rocher traitée : 500 m	Alésage à l'explosif et soutènement par boulons, cintres, béton projeté, et voûtes parapluie aux têtes	Forage d'appel + Géospaceur recouvert de béton projeté (drainage linéaire)	Chemisage : DEG-S + Revêtement en béton coffré (aux têtes uniquement)	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation des piédroits de pose du chemisage • Mise en place de l'outil coffrant • Clavage de la clé de voûte
12. Tunnel du col de Menée Travaux en 2013 Longueur de joints traitée : 1 000 m Surface de piédroit étanchée : 200 m ² Surface de piédroit imperméabilisée : 370 m ²			Traitements intrados adhérents : SEPC sur les zones les plus dégradées des piédroits + Enduit mince d'imperméabilisation sur les zones moins dégradées des piédroits + Saignées drainantes avec ½ coquille calfeutrée au niveau des joints de bétonnage avec traitement confortatif sur 50 cm de largeur par SEL-A	<ul style="list-style-type: none"> • Préparation du support • Projection du SEPC • Projection du béton fibré de confinement • Application de l'enduit mince d'imperméabilisation • Réalisation par sciage de la saignée • Réalisation des forages d'appel dans la saignée • Mise en place de la 1/2 coquille • Réalisation de la bande de confortement en SEL-A
13. Tunnel de Rive-de-Gier Travaux en 2015 Longueur de joints traitée : 1 010 m Surface de voûte étanchée : 2 214		Pontage par bande élastomère des joints de plots et saignées drainantes existantes (drainage linéaire)	Traitement intrados adhérent : SEL-A	<ul style="list-style-type: none"> • Décapage UHP du support • Piquage / hydrodémolition des zones de béton altéré et décapage des aciers corrodés • Enduit de surfacage des piédroits • Réparation au mortier R4 projeté des zones de béton altéré en voûte • Pontages par bandes élastomère • Mise en œuvre du SEL-A

Travaux réalisés postérieurement aux fiches chantier

Les fiches de cas précédentes ont été rédigées par le CETU quelque temps après la fin des travaux, pour la plupart anciens. Depuis, certains tunnels ont connu de nouvelles réparations, soit parce que les anciennes n'ont pas donné entière satisfaction, soit parce que de nouveaux désordres sont apparus hors des zones précédemment réparées. Il s'agit des tunnels suivants :

- **Tunnel des Échelles (Fiche chantier 02)**

Malgré les travaux de 1993, le tunnel présentait de nombreuses venues d'eau sur ses 100 premiers mètres (côté Les Échelles). Pour le réparer, trois procédés d'étanchement innovants ont été expérimentés. Ces travaux se sont déroulés en 2013, sous maîtrise d'ouvrage du Département de la Savoie, dans le cadre du projet d'innovation ECOMINT (Étanchéité par COques MINces en Tunnels). Ce projet avait été sélectionné par le MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie) en 2012. Sous maîtrise d'œuvre du Département, et avec l'assistance du CETU, les travaux ont été réalisés par l'entreprise ETANDEX.

Une brève présentation du projet ECOMINT et des trois procédés d'étanchement soumis à l'expérimentation est donnée en *Annexe 3 : Présentation succincte du projet ECOMINT au tunnel des Échelles (73)*.



Illustration 4 : Tunnel des Échelles – État du tunnel avant travaux (en haut) – Pendant les travaux de 2013 (en bas)

Les trois procédés proposés ont visé une parfaite étanchéité, pour un coût et une emprise bien inférieurs aux techniques de niveau de performance équivalent, par exemple le classique chemisage associant un dispositif d'étanchéité par géomembrane synthétique (DEG-S) et un revêtement en béton coffré.

L'intérêt des procédés minces de traitement des venues d'eau est majeur dans les tunnels existants pour lesquels les contraintes liées à la préservation du gabarit sont toujours importantes.

Un autre point fort de ces procédés d'étanchement est de permettre la réalisation des travaux en minimisant leur impact sur la circulation. Cette dernière a été maintenue en alternat pendant la journée et les fermetures de nuit sont restées limitées aux travaux nécessitant une coupure des deux voies de circulation. Pour ces procédés, les conditions d'exploitation du chantier sont modulables en fonction des contraintes du site. Celles-ci ont été choisies pour gêner le moins possible les usagers tout en limitant les surcoûts et autres inconvénients des travaux de nuit. Un bilan complet des travaux a été dressé dans un rapport destiné à évaluer cette expérimentation (contacter le CETU pour toute information complémentaire).

- **Tunnel du Rond-Point (Fiche chantier 04)**

De juin 2010 à juillet 2011, le tunnel du Rond-Point a fait l'objet d'une opération de mise en conformité au regard de la circulaire interministérielle n°2000-63 relative à la sécurité des tunnels (nouveaux équipements de sécurité et de surveillance, nouvelle ventilation, nouvel éclairage, création d'intertubes, pose de caniveau à fente...). Afin d'assurer la durabilité des équipements en voûte, certains joints PRT fuyards, mis en place en 1995, ont été repris.



Illustration 5 : Tunnel du Rond-Point – Joints drainés types Marquaires mis en place en 2010 (avant réparation)

La technique mise en œuvre a été celle des saignées drainantes déjà utilisées pour le tunnel du Marquaires en 2006 (Fiche chantier 10). Par contre, cette technique, qui avait donné satisfaction lors de sa première utilisation, s'est avérée beaucoup plus délicate à mettre en œuvre avec un fort débit d'eau dans la saignée au moment des travaux. C'est pourquoi, le drainage de certains joints de plots de bétonnage réparés en 2010-2011 s'est avéré inefficace à terme et a mérité un nouveau traitement d'étanchement, par pontage, durant l'été 2019.

Nota bene : depuis, une nouvelle technique de saignées drainantes associées à un traitement confortatif a été prescrite et réalisée avec succès dans le tunnel du

Col de Menée (Fiche chantier 12). C'est maintenant cette technique qui fait référence en matière de traitement localisé des joints de plots.

- **Tunnel du Grand Chambon (Fiche chantier 05)**

Le tunnel a présenté pendant de nombreuses années une pathologie de convergence et de fissuration **en dehors de la zone concernée par cette fiche**. Cette pathologie s'est conclue par un effondrement localisé de l'ouvrage en 2015 et la construction d'un nouveau tronçon d'ouvrage. La zone réparée est aujourd'hui devenue une issue de secours du tunnel réaménagé. Cette fiche est conservée pour son retour d'expérience sur la technique des tôles parapluie.

TUNNEL DU GRAND CLÔT

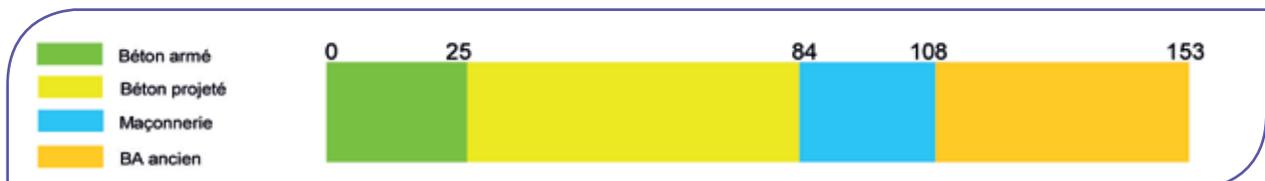
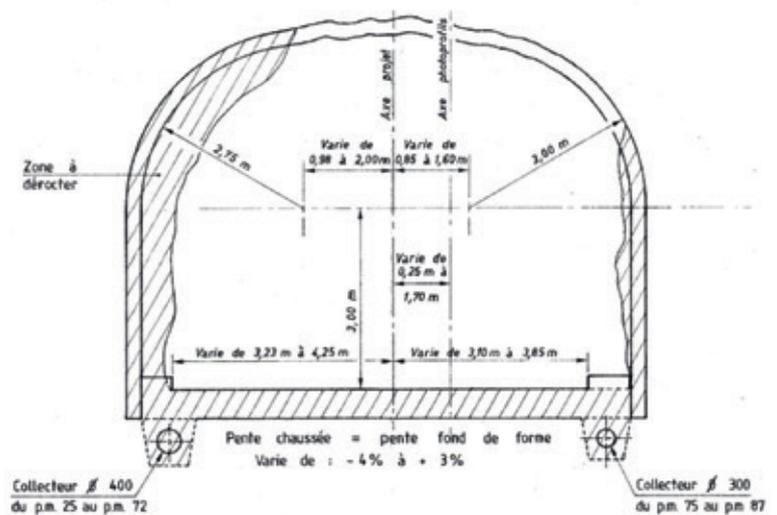
TRAVAUX EN 1989-1990 : TRAITEMENT DES VENUES D'EAU PAR ÉTANCHÉITÉ ISOLANTE PLAQUÉE ET REVÊTEMENT DE BÉTON PROJETÉ



Tête côté La Grave

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1880
- **LOCALISATION** : RND1091, Hautes-Alpes (05)
- **ALTITUDE** : 1300 m environ
Climat : tunnel implanté au fond d'une gorge froide et peu ensoleillée (gel pendant une grande partie de l'hiver)
- **LONGUEUR** : 153 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** : tracé en S, dont l'angle vif a été réalisé en 1989-90
- **PROFIL EN LONG** : rampe de 4,4 % (aval) à 1,3 % (amont)
Profil en travers : dans la section en béton projeté, l'alésage de l'intérieur du virage introduit une surlargeur variable dans la courbe :
 - largeur entre piédroits : 6,3 à 8,20 m
 - 2 trottoirs de 0,75 à 1,0 m
 - gabarit : 4,30 m



SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de 5 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1975, 1982, 1992, 1999 et 2003.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Travaux de Génie Civil antérieurs à 1989 :

- Travaux de création d'un cadre paravalanche en 1971 côté amont du tunnel. Le drainage s'effectue à l'aide de barbacanes en piédroit nord. Le revêtement est en béton armé et le piédroit sud est revêtu de maçonnerie en extérieur.

- Travaux de création d'un paravalanche côté aval du tunnel en 1979.

L'opération d'alésage du tunnel de 1989-1990 s'inscrit dans le cadre des renforcements coordonnés de la RN 91.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Le tunnel, entre les PM 25 à 87, a été laissé non revêtu depuis la construction. Au cours de l'inspection détaillée de 1976, il est apparu nécessaire d'effectuer des purges dans cette zone et d'examiner l'état de l'étanchéité des zones des PM 0 à 22 et 110 à 153.

En 1982, l'inspection de la section non revêtu PM 25-87 relève des zones de suintements et des venues d'eau entraînant de l'humidité sur la chaussée et la formation de verglas en hiver (PM 30 à 50). Des PM 74 à 87, les suintements sont généralisés en raison de la

présence d'une cascade au-dessus du tunnel au droit de cette section.

Par ailleurs dans la section centrale non revêtu (PM 25 à 87), la largeur entre piédroits est de 6 m, avec une courbe du tracé en plan à faible rayon (moins de 30 m) sans surlargeur de chaussée pour le passage des PL. Les hors profils sont nombreux et l'effet de paroi très marqué en raison de l'absence de trottoirs. Les conditions de circulation sont mauvaises, en particulier pour les poids-lourds, les deux-roues et les piétons.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Les études conduites en vue d'une réfection de l'ouvrage prévoyaient :

- l'alésage du virage de la section centrale non revêtu du tunnel pour permettre le croisement des PL ;
- l'étanchéité de la zone non revêtu qui est le siège de nombreuses venues d'eau ;
- des dispositions pour arrêter les chutes de petits blocs provenant de l'excavation rocheuse non revêtu.

L'APROA de 1987 répond à ces objectifs et propose deux solutions pour la réalisation d'un revêtement étanche dans la zone réalésée (PM 25 à 87) :

1 – Une étanchéité traditionnelle en membrane PVC protégée par un revêtement en béton coffré non armé, d'épaisseur minimale 40 cm. Cette solution s'adapte mal aux variations géométriques des profils en travers engendrés par la création de surlargeurs en virage (coffrages coûteux).

De plus, l'utilisation des coffrages constituerait une entrave à la circulation des usagers, rétablie la journée après l'interruption pour les travaux réalisés la nuit.

2 – Après réalisation du soutènement par béton projeté de l'excavation rocheuse alésée, il est mis en place une étanchéité par plaques de mousse de polyéthylène extrudée étanche et isolante de type « Ethafoam » associées à un complexe drainant Delta MS disposé contre l'excavation. Les plaques sont fixées au soutènement de l'excavation par des tiges traversantes en acier et soudées les unes aux autres.

Les plaques de mousse formant l'étanchéité sont ensuite protégées par une coque en béton projeté armée par un treillis soudé maintenu par les tiges de fixation des plaques.

Choix de la solution : la seconde solution, moins contraignante pour la circulation routière pendant les travaux et globalement moins coûteuse que la première, a été retenue. Elle est estimée à 2 300 000 F TTC.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

Dossier de consultation des entreprises

Mise en œuvre de la solution retenue :

- purge et nettoyage du support rocheux après alésage avant la projection du béton de régularisation et de soutènement ;
- fixation de bandes Delta MS par spits contre le béton projeté de soutènement, captage et évacuation des venues d'eau ponctuelles ;

- fixation contre la paroi de l'Ethafoam (ép. 5 cm) ;
- mise en place d'un grillage souple triple torsion à mailles réduites qui fixe le béton lors de sa projection ;
- accrochage rigide d'un treillis soudé aux tiges de fixation de l'Ethafoam ;
- application sur l'Ethafoam de béton projeté par voie sèche (d'épaisseur minimale 10 cm).

Nouvelle estimation de l'administration :

2 700 000 F TTC (411 840 €)

Organisation des travaux :

Les déroctages, les purges, ainsi que la projection du béton doivent s'effectuer de nuit, sous coupure totale de la circulation. Le boulonnage, la pose de l'étanchéité et du treillis soudé peuvent s'effectuer de jour, sous alternat de circulation si besoin.

Il n'existe pas de déviation possible de la RN 91. Des créneaux de coupure totale de la circulation ont été définis ainsi : Toutes les nuits sauf celles du vendredi soir au dimanche matin, la circulation peut être coupée totalement pendant 8 heures, en laissant toutefois la possibilité de dégager rapidement une voie pour les véhicules de secours. Lors du rétablissement de la circulation le jour, si le gabarit ne permet pas une circulation à double sens, la régulation se fait par alternat sur une voie, avec feux tricolores.

MARCHÉ ET TRAVAUX

Les travaux ont été séparés en deux tranches, une tranche ferme et une tranche conditionnelle, car l'enveloppe financière ne permettait pas de couvrir l'estimation de 2,7 MF :

- tranche ferme : alésage et collecteur d'assainissement (1 230 000 F TTC) ;
- tranche conditionnelle : drainage et raccordement à l'assainissement, étanchéité, béton projeté et trottoirs (1 470 000 F TTC dont 351 000 F pour l'étanchéité).

Le marché a été passé après un appel d'offres restreint.

Date du marché : 4 juillet 1989

Montant du marché : 2 897 360,23 F TTC

(TF : 1,068 MF et TC : 1,871 MF TTC)

Titulaire du marché : Groupement PICO-PELLER

Sous-traitance : ETANDEX pour l'étanchéité et le drainage (950 000 F TTC)

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX DE LA TRANCHE FERME

Démarrage des travaux de la tranche ferme :

28 août 1989

Délai d'exécution prévu : 1,5 mois.

Fin des travaux de la tranche ferme : 15 octobre 1989

● DOSSIER DE RÉÉVALUATION : janvier 1990

Il met l'accent sur les postes sur lesquels sont apparus des écarts importants entre les estimations (APROA de 1987) et les prix de l'appel d'offres (en particulier +93 % pour le drainage de surface et l'étanchéité).

Il en résulte une demande d'augmentation du budget affecté aux travaux de 2,3 M F TTC à 2,9 MF TTC.

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX DE LA TRANCHE CONDITIONNELLE

Délai d'exécution prévu : 1,5 mois

Des malfaçons ayant été constatées sur le chantier (visite CETU), la DDE a décidé, mi-juin 1990, de suspendre la projection de béton dans le tunnel :

- le treillis soudé étant plaqué contre l'Ethafoam, l'épaisseur de béton projeté est plus faible que

celle prévue au marché. Dans ces zones, un second treillis soudé sera placé en voûte ;

- au droit des tiges et boulons, le rétablissement de l'étanchéité doit être réalisé par pastille PVC ou mastic et non par plaque d'acier ;
- les points de fixation de l'Ethafoam (au minimum 3 par mètre carré) doivent être revêtus par feuille Ethafoam thermosoudée.

La situation n'étant pas résolue au 30 juin 1990, il est alors décidé de suspendre les travaux pendant la période estivale (du 30 juin au 3 septembre 1990), le délai contractuel de réalisation des travaux étant à cette échéance écoulé.

● AVENANT

Le montant total du marché est porté à 3 063 830 F TTC. Le montant de la tranche ferme est réduit à 556 600 F TTC et celui de la tranche conditionnelle porté à 2 507 000 F TTC (382 400€).



BILAN DES TRAVAUX

La tranche conditionnelle a été réceptionnée avec réserves sur des fuites d'étanchéité constatées notamment au droit de certaines traversées de fixation des plaques. La réparation proposée par l'entreprise consistait à réaliser des injections de mousse pour arrêter ces arrivées d'eau.

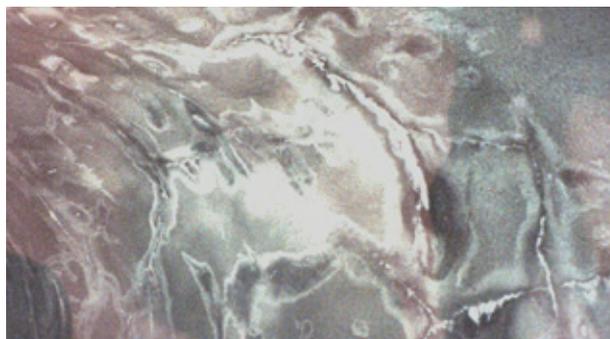
La société Etandex ayant réparé les fuites apparentes sur le béton projeté, les réserves à la réception des travaux ont pu être levées en juillet 1992.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Lors de l'inspection de 1999, la coque de revêtement en béton projeté armé est parcourue de fissures de type faïençage qui ne menacent pas la stabilité du revêtement. Les fissures sont soulignées de calcite blanche et d'auréoles de dépôts clairs. Ces dégradations se sont affirmées depuis 1992. Elles mettent en évidence un défaut d'efficacité du système de drainage et d'étanchement mis en place.

Aucune instabilité n'est visible en voûte où le béton conserve une bonne cohésion.

L'humidité s'est accrue, par percolation de l'eau dans les fissures de faïençage.



Taches de calcite en voûte sur le revêtement en béton projeté

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

L'étanchéité du tunnel du Grand Clôt est réalisée par des plaques de mousse isolante qui sont fixées par des ancrages traversants servant également au maintien du treillis d'armature de la coque.

Après la pose des plaques, l'étanchéité a été rétablie au droit des ancrages traversants avec du mastic. L'origine des défauts d'étanchéité constatés après les travaux au droit de fixations serait la détérioration du mastic lors de la projection du béton de revêtement ou au fil du temps.

Une des difficultés du chantier a été de réaliser un revêtement en voûte de portée variable afin de suivre les piédroits, après la création des surlargeurs par l'alésage du virage.

En conclusion, la méthode d'étanchéité utilisée au Grand Clôt est peu performante. En effet, il est difficile d'assurer complètement l'étanchéité au droit des nombreux ancrages traversants qu'elle impose. Plusieurs solutions alternatives existent aujourd'hui.

TUNNEL DES ÉCHELLES

TRAVAUX EN 1993 : TRAITEMENT DES VENUES D'EAU PAR PLAQUES DE MOUSSE ÉTANCHE ET ISOLANTE OU PAR MATÉRIAU DRAINANT TYPE DELTA PT FIXÉS AU ROCHER



Tête côté Chambéry

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : terminé en 1813
- **LOCALISATION** : RD 1006, Savoie (73)
- **ALTITUDE** : 530 m
Climat : 1 500 mm de pluie sur 150 jours de l'année ; températures de -4°C à $+26^{\circ}\text{C}$; 70 jours de gelée
- **LONGUEUR** : 294 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** : rectiligne
- **PROFIL EN LONG** : pente de 4.8 %
Profil en travers :
 - tunnel initialement brut de déroctage, rayon 3,5 m environ
 - largeur entre piédroits : 7,95 à 8,55 m
 - chaussée : 6,34 à 6,90 m
 - 2 trottoirs de 0,60 à 1,18 m
 - gabarit autorisé : 4,40 m
- **REVÊTEMENT** : partiellement revêtu depuis les travaux de 1993

- **TRAFIC EN 1993** : 6 000 véhicules par jour, dont 10 % de poids lourds
- **DRAINAGE** : drains longitudinaux \varnothing 100 mm en base de piédroits, dans les sections étanchées à « l'Ethafoam », raccordés aux caniveaux situés sous les trottoirs



Section courante côté Les Échelles

SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de 5 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1976, 1983, 1991, 1995 et 2001.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Aux environs de 1900, des tôles de protection (tôles parapluies) ont été posées (en voûte uniquement) pour préserver la chaussée des venues d'eau. La chute d'une partie de ces tôles a été responsable d'un accident mortel en 1919. Il semble qu'elles aient été conservées jusqu'en 1930. De nombreuses fissures ou zones fracturées ont été bouchées ou ragréées au mortier de ciment, vraisemblablement vers 1903.

En 1965, les caniveaux ont été réalisés sous les trottoirs. En 1983, la cunette cimentée surmontant la tête côté Chambéry a été reprise pour mieux éviter les ruissellements du talus d'entrée sur la chaussée.

En 1991, la falaise surplombant la tête Les Échelles a été purgée, ainsi que la voûte du tunnel pour traiter les instabilités les plus marquées.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Inspection détaillée de 1976 :

La partie supérieure des piédroits comporte des blocs instables, en petites zones à risques réparties régulièrement. Entre les PM 80 à 85, cette instabilité est aggravée par une zone bréchique dans la voûte.

La tête Ouest (Échelles), non revêtue et non boulonnée, montre dans la voûte quelques plaques de roches très légèrement décollées par des fissures parallèles au front de taille. Elle est surmontée par une falaise verticale qui peut présenter des risques de chutes de blocs malgré un bon aspect du rocher. La tête Est (Chambéry) montre une fracturation abondante du rocher. Cette zone peut présenter des instabilités.

Inspection détaillée de 1983 :

De nouvelles instabilités localisées apparaissent, qui doivent être traitées afin d'éviter des chutes de blocs.

Les zones anciennement ragréées, malgré leur bon aspect, peuvent parfois être instables (chutes de petites plaques de ciment décollées).

Les venues d'eau sont directement liées à la pluviométrie. Elles sont importantes.

Inspection détaillée de 1991 :

Les enduits-ciment anciens commencent à se perforer localement (altération, gel) en provoquant de petites instabilités.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

En 1976 il est proposé de capter les venues d'eau ponctuelles et de stabiliser les zones décomprimées par un béton projeté armé de treillis soudé, épinglé au rocher.

Au niveau des têtes, c'est un boulonnage du rocher et un revêtement de béton projeté dans les zones les plus fracturées qui sont recommandés, ainsi que la construction d'une casquette pare-blocs, côté Chambéry.

Le rapport de 1991 ajoute que des purges doivent être effectuées dans tout l'ouvrage et ses abords immédiats.

L'étude de réfection de 1985 indique qu'il faudrait étancher plusieurs zones par membrane PVC protégée par un anneau en béton coffré de 30 cm d'épaisseur nominale. Les collecteurs d'assainissement devraient aussi être reconstruits et mis hors gel.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

L'état du tunnel ne correspond plus aux besoins du trafic de l'itinéraire.

L'APROA de 1992 propose un choix entre deux types d'aménagement de l'ouvrage :

1 – Un alésage de l'ensemble du tunnel pour assurer un gabarit de 4,50 x 7,00 m avec une voûte bétonnée et étanchée. Une rectification du virage d'entrée à la tête Les Échelles est également proposée ;

2 – Un reprofilage localisé en reins de la voûte, pour augmenter la hauteur libre minimale à 4,40 m (4,30 + 0,10 pour rechargement ultérieur de chaussée) x 6,50 m, un confortement et un étanchement localisés de la voûte et enfin une rectification du virage d'entrée de la tête Ouest. Outre son coût élevé (3 à 4,5 M€), la première solution nécessite une coupure totale de la circulation sans qu'il soit possible de la dévier.

La seconde proposition, moins chère, a été retenue car elle autorise un maintien partiel de la circulation.

Les travaux de reprofilage localisé de la voûte se sont déroulés la nuit avec un maintien de la circulation en alternat.

Description du projet retenu :

Alésage : aménagement du profil en travers du tunnel avec une hauteur libre à 4,40 m (4,30 + 0,10) x 6,50 m en section courante, par déroctage des reins de la voûte.

Aménagement de la tête Ouest : rectification du virage d'entrée (afin de porter le rayon de courbure de R = 27 m à R = 40 m) par déroctage de l'intérieur du rayon de courbure sur une épaisseur maximale de 4 m environ. Cette opération nécessite un soutènement de l'intrados de la tête par mise en œuvre de boulons HA Φ 32 de 6 à 8 m de longueur, scellés sur toute leur longueur.

Soutènement : confortement de surface par boulons HA Φ 25 (longueur 2 à 3 m – 1 boulon pour 2 m²), et boulonnage de la voûte dans les zones instables par boulons HA Φ 32 (longueur 3 à 8 m – 5 boulons par mètre de tunnel).

Étanchéité : dans les zones humides, mise en place de plaques de mousse à cellules fermées « Ethafoam » de 2,5 cm d'épaisseur. Fixation de l'Ethafoam à la voûte par les boulons HA Φ 25.

Revêtement : protection mécanique de l'étanchéité réalisée par béton projeté d'épaisseur 10 à 12 cm, armé par un treillis soudé (maille 150 x 150, \varnothing 6 mm).

Drainage : réalisation de cunettes longitudinales en base de piédroits pour la collecte des eaux drainées.

Bassin décanteur : il est prévu de réaliser un bassin de décantation des eaux de ruissellement du tunnel avant leur rejet dans la nature.

MARCHÉ ET TRAVAUX

DCE : réalisé par la DDE 73

● TRAVAUX PRÉVUS AU MARCHÉ

Travaux réalisés de nuit, hors circulation.

Durée prévue : 4 mois

Purge générale du tunnel et des falaises surplombant les têtes

Alésage du tunnel par déroctage pour assurer une hauteur libre minimale de 4,30 m (+ 10 cm pour rechargement éventuel ultérieur de la chaussée soit 4,40 m)

Élargissement du virage en tête Les Échelles par déroctage sur 30 m. Soutènement préalable des falaises et de la voûte existante par des boulons HA Φ 32 de 6 m et des tirants d'ancrage HA Φ 32 injectés sur toute leur longueur (4 à 7 m). Réalisation d'une coque en béton projeté de 10 cm d'épaisseur, armée de treillis soudé (100 x 200, \varnothing 6 et 5,5 mm, distance au support 2 cm), ancrée par des épingles HA Φ 12 de longueur 1 m en acier crénelé Fe E 40 (1 pour 2 m²).

Soutènement de la section PM 80 à 100 par boulons et coque identique à la précédente. Boulonnage dans les autres zones instables.

Étanchement des zones à venues d'eau par plaques Ethafoam de 2,5 cm, ancrées par des épingles HA Φ 20 de 1 m de longueur en acier crénelé Fe E 40 (3 par m²). Elles sont protégées par une coque en béton projeté de 7 cm d'épaisseur, armée de treillis soudé (150 x 150, \varnothing 4,5 mm, distance au support 3 à 5 cm), avec un intercalaire entre TS et Ethafoam en grillage à poules.

Étanchement des zones humides de petite surface par matériau drainant Delta PT, protégé par une coque identique à la précédente

Revêtement (vue en plan) :

Signature du marché : 13 août 1993

Objet : aménagement, confortement et étanchement

Titulaire : CHANTIERS MODERNES

Montant du marché : 360 000 € HT (2 360 000 F).

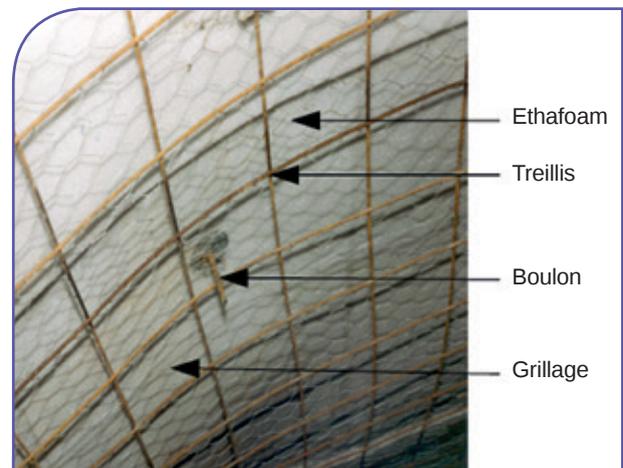
Postes principaux		PU HT en €
Béton projeté	380 m ³	215
Boulons de soutènement	1350 m	29,7
Boulons d'épinglage	1200 m	27,2
Mise au gabarit	250 m ³	31

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX

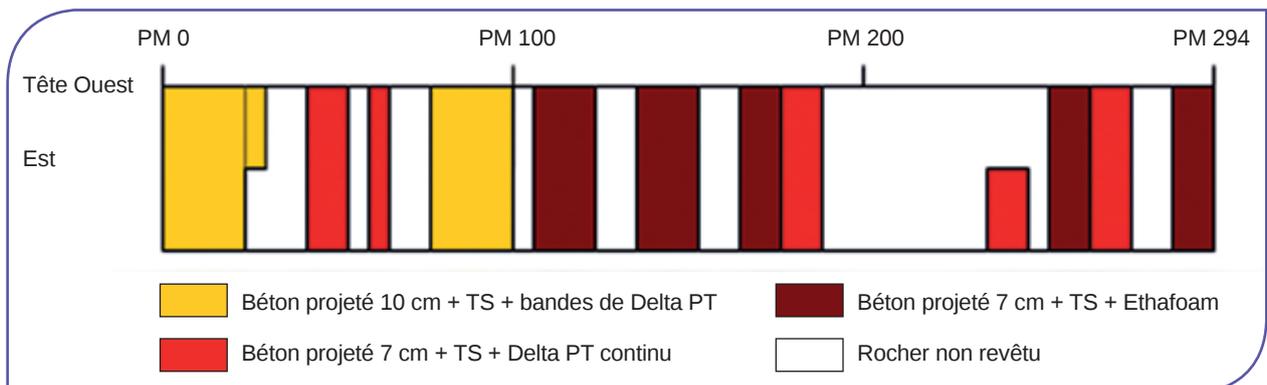
Durée des travaux : 3,5 mois

Évolution dans le traitement des venues d'eau :

Au début du chantier, les venues d'eau importantes et ponctuelles ont été captées par tuyau PVC descendu le long du piédroit. Par la suite, une bande de Delta PT a été posée depuis l'émergence de l'eau jusqu'au caniveau.



Plaques Ethafoam



BILAN DES TRAVAUX

Décompte général :

538 000 € HT (3 530 000 F HT)

Par rapport au marché, l'augmentation est due :

- à un dépassement de la quantité de béton projeté pour 90 000 € (+ 110 % de la quantité prévue) ;
- à une plus-value (résistance de la roche) sur la mise au gabarit pour 45 000 € ;
- à divers travaux non prévus pour 35 000 €.

Bilan technique :

Pas d'interruption de chantier ou de problème majeur durant les travaux.

Pour éviter la chute de blocs, les parois ont été purgées immédiatement après l'alésage.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Inspection détaillée de 1995 :

Après les travaux de 1993, l'ouvrage présente, dans les zones revêtues de béton projeté, des conditions de stabilité satisfaisantes. Dans les sections non revêtues, les zones qui ont été ébranlées par le déroçtage présentent un risque d'effritement en petits éléments.

L'étanchéité est correcte dans les sections traitées avec les plaques d'Ethafoam. Elle est moins bonne dans les zones de Delta PT posé de manière continue, et encore moins satisfaisante là où le delta PT est disposé ponctuellement.

Inspection détaillée de 2001 :

Les sections équipées d'étanchéité Ethafoam et revêtues de béton projeté présentent un faïençage de retrait moins développé que les sections équipées de Delta PT.

En terme d'étanchéité, l'humidité revient légèrement dans les zones équipées d'Ethafoam, vraisemblablement à la faveur de fuites au droit des fixations traversant les plaques. Dans les zones équipées de Delta PT, les venues d'eau sont plus abondantes.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Le gestionnaire est globalement satisfait de l'étanchement réalisé, que ce soit par plaques Ethafoam ou Delta PT. Il aurait souhaité que le tunnel soit étanché sur toute sa longueur.

De fait, ceci aurait évité les venues d'eau sur une longueur de 15 m à la tête côté Échelles, qui se traduisent par des gouttes à gouttes sur la chaussée. L'enrobé subit à cet endroit un dépôt de calcite qui rend la chaussée glissante. L'effet est accentué par le virage très serré de sortie du tunnel. Un rabotage superficiel de la chaussée a été effectué en 2001, il est à répéter régulièrement pour améliorer l'adhérence de la chaussée.

En tunnel, il aurait fallu recouvrir de béton projeté les zones où le rocher a été laissé nu après l'alésage et la purge du tunnel, afin d'éviter les chutes de petits blocs provenant de l'effritement du rocher.

De plus, il subsiste deux types de risques qui auraient pu être évités si un élargissement de la section de l'ouvrage avait été réalisé lors des travaux :

- la faible largeur roulable pour les poids lourds et les trottoirs rétrécis par l'épaisseur du béton projeté (jusqu'à 30 cm de largeur par endroits) ;
- les pistes cyclables interrompues dans le tunnel, à cause du manque de largeur de la chaussée.

TUNNEL DU RESQUIADOU

TRAVAUX EN 1994 : ÉTANCHEMENT PAR COQUE INDÉPENDANTE EN BÉTON PROJETÉ



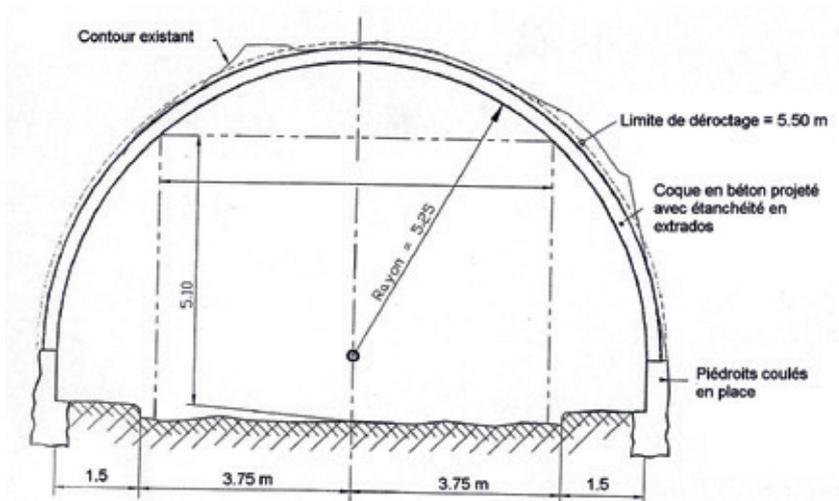
Tête côté Marseille

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- DATE DE CONSTRUCTION : 1940
- LOCALISATION :
RD 568, Bouches-du-Rhône (13)
- MAÎTRE D'OUVRAGE : DDE 13
- ALTITUDE : environ 100 m
- LONGUEUR : 322 m
- CONDITIONS DE CIRCULATION :
ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- TRACÉ EN PLAN : alignement droit
- PROFIL EN LONG : déclivité de 3,9 %

Profil en travers :

- voûte plein cintre de 5,25 m de rayon, centrée à 1,20 m au-dessus de la chaussée finie
- largeur entre piédroits : 10,50 m
- largeur roulable : 2 voies de 3,75 m
- trottoirs : 2 trottoirs de 1,50 m
- gabarit autorisé : 5,10 m



SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de 5 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1974, 1982, 1989, 1995 (après les travaux de 1994-1995) et 2002.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Travaux de réfection de 1984 : démolition d'un anneau de maçonnerie vétuste (PM 69 à 78) puis reconstruction de l'anneau en béton coffré (avec feuille d'étanchéité et système de drainage) ; purges diverses en zones non revêtues.

APROA 1986 : pour les zones non revêtues, le projet prévoyait un alésage et des purges préalables à la mise en place de tôles parapluie, ainsi que la confortation des zones instables par boulonnage et béton projeté. Le montant des travaux est estimé à 4,1 MF TTC.

Note du CETU du 06/01/1987 : comparaison de la solution classique « béton coffré et étanchéité par feuille PVC » avec la solution « tôles parapluie » proposée dans l'APROA de 1986.

Ce document concluait à l'avantage technique de la solution « béton coffré », les deux solutions présentant par ailleurs des coûts sensiblement équivalents.

1989 : le CETU transmet à la DDE 13 les éléments de rédaction d'un nouvel APROA, sur la base d'observations recueillies lors de l'inspection détaillée de 1989. La solution technique retenue est l'option « béton coffré ».

APROA 1991 : inscription du tunnel du Resquiadou au programme triennal 1991-93.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

On constate dès 1974 que, dans les zones non revêtues, l'instabilité rocheuse laisse craindre des chutes de blocs sur la chaussée. Dans le rapport d'inspection de 1982 des purges sont préconisées dans les zones les plus fissurées. Bien que les travaux de 1984 aient permis de sécuriser l'ouvrage, on envisage en 1986 la confortation des zones instables par boulonnage et béton projeté, ainsi que la pose de tôles parapluie pour arrêter les venues d'eau.

Le rapport d'inspection de 1989 recommande de traiter rapidement les venues d'eau, relativement abondantes en période humide et à l'origine de stalactites en hiver. Le projet de réparation devait donc proposer une solution pour stabiliser l'excavation rocheuse dans les parties non revêtues, afin d'éviter les chutes de blocs sur la chaussée, et traiter les problèmes liés aux arrivées d'eau.

L'inspection met en évidence trois zones nécessitant des travaux de confortement prioritaires :

- **zone A** : humidité et chutes de blocs (zones non revêtues). Longueur cumulée des trois tronçons : 142 mètres ;
- **zone B** : humidité et altérations superficielles des bétons (zones revêtues). Zone d'environ 35 m de longueur ;
- **zone C** : corrosion des armatures (têtes du tunnel). Surface : 10 m² environ.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

La solution retenue au début des années 90 est un revêtement en béton coffré. Cette solution classique ne nécessite pas d'entretien (pour l'étanchéité), ce qui présente un avantage par rapport à la solution voûte parapluie pour un coût similaire.

Coût de la solution en béton coffré : en 1989, le montant des travaux pour la partie « béton coffré » est estimé à 3,8 MF TTC environ.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

APROA 1991 : établi en accord avec le CETU. Pour les 3 zones mentionnées dans le diagnostic, les différentes phases de travaux sont détaillées et accompagnées d'une estimation financière

2 décembre 1991 : avis favorable de l'IGOA

15 mars 1993 : opération retenue par la Direction des Routes

Décembre 1993 : appel d'offres. Il n'est pas prévu de variante mais des propositions techniques peuvent être faites sur la constitution de la voûte béton

Description des travaux envisagés :**Zone A :**

- alésage du tunnel (40 cm moyen sur le rayon) ;
- confortement par boulons des instabilités rocheuses ;
- application d'une couche d'égalisation en béton projeté de 3 cm d'épaisseur moyenne ;
- mise en place d'une feuille d'étanchéité PVC continue et d'un système de récupération des

eaux à la base des piédroits (drains longitudinaux) raccordé aux caniveaux existants ;

- réalisation d'un revêtement en béton coffré de 40 cm d'épaisseur.

Zone B : drainage des zones bétonnées par saignées drainantes et forages d'appels.

Zone C : sablage des pavements en pierre et ragréage des encorbellements en béton armé des têtes.

MARCHÉ ET TRAVAUX

Date du marché : 18 août 1994

Montant du marché : 4 739 303,44 F TTC (722 895 €)

Mandataire : GIRAUD / NORD FRANCE TP

● TRAVAUX DE LA ZONE A

Dans la zone A, le déroctage s'est avéré plus long que prévu du fait de la dureté du rocher, le retard sur ce poste a été évalué à environ un mois.

L'entreprise a proposé en cours de chantier de remplacer la voûte prévue au marché par une coque préfabriquée, moins épaisse. Il s'agit d'une coque en béton projeté sur ossature métallique préfabriquée munie d'une étanchéité posée (voir la fiche d'information CETU n°15). Pour l'entreprise, la variante permet de réduire le volume de déroctage (en limitant l'épaisseur à 20 cm) et le délai d'exécution, ainsi que de diminuer le montant des travaux.

Le béton projeté a une épaisseur réelle de 12 cm en clé à 16,5 cm au droit des appuis de la coque sur les piédroits.

Un avenant au marché a été signé le 19 mai 1995 pour l'acceptation de cette variante ainsi que pour valider l'augmentation de la masse des travaux et la prolongation du délai d'exécution.

● TRAVAUX DES ZONES B ET C

Le drainage des zones bétonnées (zone B) par des saignées drainantes et forages d'appel, ainsi que le traitement de la zone C ont été réalisés sans problème majeur.

La déviation de la RN 568 a été livrée le 18 octobre 1994, avec un mois de retard.

L'augmentation globale de la masse des travaux prévue au marché est de 12 % (elle est due aux travaux d'agrandissement de la surface des parkings sur la déviation en bord de mer et aux travaux de rénovation des têtes). La variante proposée par l'entreprise a permis de minorer de 2,2 % le coût des travaux.

Un tableau comparatif des deux solutions (béton coffré et béton projeté) donne le montant de l'économie réalisée en adoptant la solution « voûte en béton projeté » : 104 848,33 F TTC



Variante retenue



BILAN DES TRAVAUX

Décompte général :
4 518 000 F HT (690 000 €)

Délais :
La durée totale des travaux des trois zones a été de 6 mois.

SUIVI DE L'OUVRAGE

L'inspection détaillée de 1995 évalue l'état et l'efficacité des coques indépendantes en béton projeté : leur aspect général est bon et aucune fissuration n'a été remarquée hormis au niveau des joints de dilatation transversaux. Ils sont ouverts et on note parfois un défaut d'alignement entre deux anneaux de coque de la voûte.

Les coques ont permis de supprimer les principales venues d'eau signalées avant les travaux. Toutefois, les venues d'eau réapparaissent au niveau de la reprise horizontale de piédroits.

L'eau arrivant à cette reprise serait la conséquence d'un mauvais raccordement entre l'étanchéité de la coque et celle des soubassements en béton coffré.

Une visite sur site montre que des trous de drainage ont été effectués dans le soubassement en béton coffré, l'eau s'écoule depuis très largement sur le trottoir.

La dernière inspection de 2002 note que les coques en béton projeté ne sont affectées d'aucun désordre, hormis les arrivées d'eau qui apparaissent au contact des soubassements et des coques.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

L'économie réalisée en utilisant cette technique, innovante à l'époque, reste marginale et on peut penser que la solution du marché eut été plus efficace en terme d'étanchéité. Cependant la variante a permis de réduire la durée des travaux en réduisant le volume des déblais par rapport à la solution de base. Toutefois en acceptant un avenant technique pendant le chantier, le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont eu peu de recul pour juger des défauts éventuels que pouvait présenter la solution proposée (étanchéité à la reprise horizontale des piédroits).

Depuis la réparation du tunnel du Resquiadou, la technique d'étanchement de tunnels par coque indépendante en béton projeté a évolué (cf. fiche d'information CETU n°15). Ont été modifiés notamment la hauteur de piédroits en béton coffré, qui doit être d'environ de 2 m et le système de raccordement de l'étanchéité de la coque à celle des piédroits.

TUNNEL DU ROND-POINT

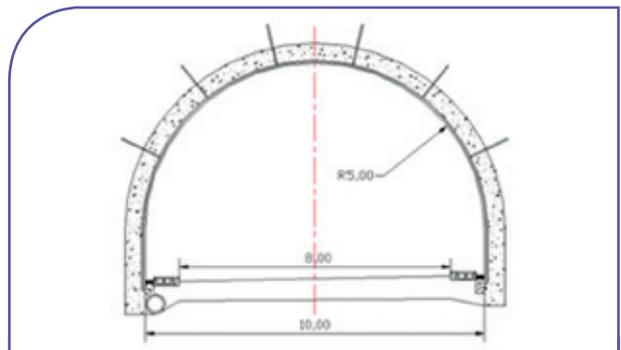
TRAVAUX EN 1994-1995 (TUBE NORD) ET 1995-1996 (TUBE SUD) :
 TRAITEMENT DES VENUES D'EAU PAR PROFILÉ DRAINANT PRT



Tête côté Firminy-Le Puy

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1964-1966
- **LOCALISATION** : A47, Loire (42)
- **ALTITUDE** : 570 m
- **LONGUEUR** : 448 m + 2 x 50 m de paralumes
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : 2 tubes parallèles unidirectionnels à 2 voies (tube nord : TN et tube sud : TS)
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN LONG** : pente de 2,9 % vers Firminy
 Profil en travers : 3 largeurs successives pour loger des voies d'accélération et de décélération (insertion et sortie)
 - **TN : PM 12 à 362. TS : PM 12 à 386,5**
Voûte de 10 m entre piliers : plein cintre
 $R = 5$ m centré à 1,58 m au-dessus de l'axe de la chaussée, largeur roulable : chaussée de 7 m + 2 bandes dérasées de 0,50 m
 - **TN : PM 362 à 387. TS : PM 386,5 à 412**
Voûte de 11,75 m entre piliers : ellipse à grand axe horizontal (hauteur 6,58 m), largeur roulable : chaussée de 8,75 m + 2 bandes dérasées de 0,50 m
 - **TN : PM 387 à 436,5. TS : PM 412 à 436,5**
Voûte de 13,50 m entre piliers : ellipse à grand axe horizontal (hauteur 6,58 m), largeur roulable : chaussée de 10,50 m + 2 bandes dérasées de 0,50 m
- trottoirs : 2 x 1 m
- gabarit autorisé : 5 m
- **REVÊTEMENT** : béton armé coffré
 - épaisseurs :
 voûte de 10 m : 0,60 m en voûte et en piliers
 voûte de 11,75 m : 0,60 m à 0,90 m en base de piliers
 voûte de 13,50 m : 0,60 m à 2,10 m en base de piliers
 - largeur des plots de béton (TN et TS) :
 4,50 m (PM 0 à 362) et 2,50 m (PM 362 à 436)
- **ÉTANCHÉITÉ ET DRAINAGE** : lors de la construction le tunnel n'a pas été étanché, des drains ont été posés en voûte sur les joints de bétonnage.



Profil en travers de la voûte plein cintre

SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de 5 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1979, 1984, 1993, 1999 et 2006.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Les travaux réalisés en cours de construction en 1964-1966 et qui ont eu une incidence sur le traitement des venues d'eau sont les suivants :

- des injections de bourrage et de collage, pour combler les vides à l'arrière du revêtement et parfaire la liaison du terrain au revêtement, ont été effectuées au coulis de ciment ;
- les venues d'eau subsistant dans certains joints de bétonnage ont été captées par des drains en demi-coquilles, logés dans des saignées verticales

arrêtées dans une cunette en base de piédroit. Les demi-coquilles sont maintenues par un mortier de bouchage des saignées ;

- dans chaque tube, un collecteur \varnothing 500 est présent sous le trottoir à droite dans le sens de la circulation. Ces collecteurs reçoivent les eaux de chaussées et les eaux des cunettes de trottoirs en base des piédroits. Sous les trottoirs à gauche, un collecteur \varnothing 150 mm recueille les eaux des cunettes de trottoirs.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

L'inspection détaillée de 1979 mentionne une fissuration généralisée, fine et peu dense. Les joints transversaux de bétonnage en section courante sont le siège de venues d'eau (concrétions, décollement de ragréage). Dans le tube Sud, les venues d'eau affectent aussi les joints transversaux des parties construites à l'air libre. De l'humidité est présente sur les trottoirs. Elle est due au débordement des cunettes qui sont souvent obstruées.

L'inspection de 1993 constate que certaines descentes verticales situées au droit des joints transversaux de bétonnage et certains renvois de la cunette vers le collecteur sont souvent colmatés ou remplis de calcite.

Le décollement et la chute de ragréages, la présence d'épaufrures au niveau des lèvres des joints transversaux de bétonnage sont également constatés.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Dès 1984, la Centrale d'Inspection propose des solutions de réparation. Ainsi, il est préconisé un ragréage et un drainage au niveau des joints transversaux, de même qu'un curage des caniveaux et des cunettes déjà presque totalement comblés.

L'inspection de 1993 indique qu'il est possible de capter les venues d'eau au niveau des joints en y plaçant un profilé drainant dans une saignée réalisée par sciage mécanique.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

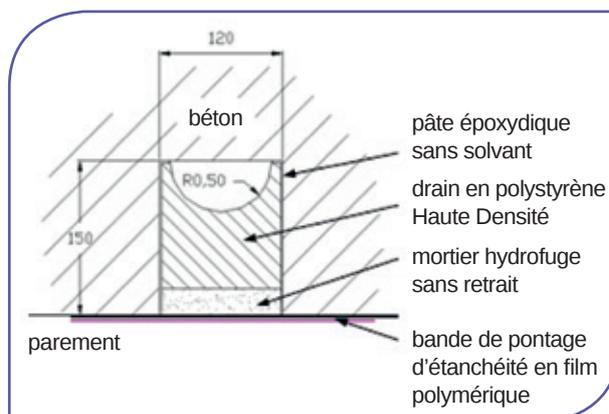
L'APROA en 1993 propose un traitement des venues d'eau par :

- injection de résines aqua-réactives dans les fissures humides affectant le revêtement en béton ;
- drainage des joints transversaux de bétonnage, avec dégagement des joints par saignées et pose de drains 120 x 150 mm aux entrées et de PRT 60 en section courante du tunnel. Des forages d'appel exécutés en fond de saignée complètent le dispositif ;
- reconstruction du système longitudinal de drainage du tunnel, en base des piédroits.

Forages d'appel : ils sont réalisés en fond des saignées. en \varnothing 36 mm tous les 2ml pour compléter le drainage en captant les eaux diffuses du massif.

Drainage des saignées :

- **aux entrées du tunnel** où il y a un risque de gel, il est prévu un drainage **thermiquement protégé** (cf. schéma ci-dessous) :



DESCRIPTION DES TRAVAUX DE DRAINAGE

Traitement des joints transversaux de bétonnage :

Réalisation des saignées : un sciage est réalisé par une scie à double lame montée sur un bras articulé, puis la saignée est dégagée avec un repiquage du béton entre les traits de scie.

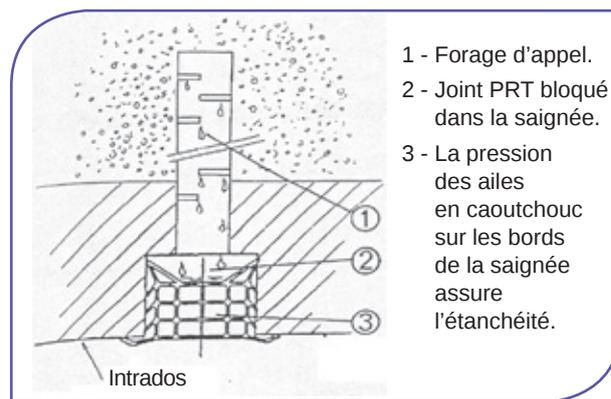
Ces drains isothermes sont scellés en fond de saignée (120 x 150 mm ou 150 x 240 mm). Au besoin, selon la qualité du béton, il est nécessaire de reconstituer les bords de saignées avec un mortier de résine. La protection mécanique du drain est assurée par un mortier hydrofuge sans retrait. L'étanchéité est réalisée par une bande de pontage en film polymérique ;

- **en section courante**, les saignées (60 x 100 mm) sont équipées de profilés **PRT** en caoutchouc synthétique. En voûte et en piédroit, le maintien des drains est complété par des barrettes en acier fixées au revêtement tous les mètres le long du profilé.

Drainage longitudinal en base des piédroits :

Approfondissement de la cunette existante pour y loger des drains PVC Ø 200 mm.

Les drains longitudinaux débouchent dans des petits regards situés tous les 50 m et reliés au collecteur général existant.



- 1 - Forage d'appel.
- 2 - Joint PRT bloqué dans la saignée.
- 3 - La pression des ailes en caoutchouc sur les bords de la saignée assure l'étanchéité.

MARCHÉ ET TRAVAUX

DCE : réalisé par le CETU

Estimation DCE des travaux :

Enduit de régularisation de surfaces béton	900 m ²
Saignées de drainage	3450 ml
Profilés PRT 600	2130 ml
Profilés PRT 1000	1020 ml
Profilés polystyrène haute densité	300 ml
Saignées longitudinales en base de piédroit	2200 ml
Injection de fissures	1000 ml

● TRAVAUX PRÉVUS AU MARCHÉ

Travaux réalisés de nuit, hors circulation.

Tranche ferme :

traitement du tube nord, du 10/1994 au 06/1995

Tranche conditionnelle :

traitement du tube sud, du 09/1995 au 04/1996

Drainage des joints transversaux entre anneaux bétonnés, par sciage mécanique de saignées équipées de drains spéciaux.

Dimensions et équipement des saignées :

- 60 x 100 mm en section courante drains en caoutchouc type PRT 60 ;
- 100 x 100 mm aux entrées, en voûte drains en caoutchouc type PRT 100 ;
- 120 x 150 mm aux entrées, en piédroits drains en polystyrène haute densité.

En base de piédroits, les profilés PRT sont protégés par des feuillards de tôle métalliques sur 2,50 m de hauteur.

Captage des eaux diffuses par des forages d'appel Ø 36 mm équipés de drains PVC cannelés Ø 30 mm, de longueur comprise entre 1 et 2 m.

Injection des fissures humides, affectant les anneaux bétonnés hors des joints, avec un gel acrylique pour les fissures à faible débit, un polyuréthane à faible viscosité pour les fissures actives très ouvertes et un polyuréthane mono-composant aquaréactif pour les venues d'eau ponctuelles.

Reconstruction du système longitudinal de drainage en base des piédroits, par logement en tranchée de collecteurs PVC Ø 200 mm. Ces collecteurs reçoivent directement les eaux des saignées drainantes.

Collecte générale des eaux drainées par regards et traversées de chaussée avec des buses en béton armé Ø 500 mm.

Excavation et aménagement d'une niche de sécurité dans chaque tube.

Signature du marché : 7 septembre 1994

Objet : travaux d'étanchement

Mandataire : SFET (Société Forézienne d'Entreprises et de Terrassements)

Montant du marché : 4 820 000 F HT (735 000 €)

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX EFFECTUÉS

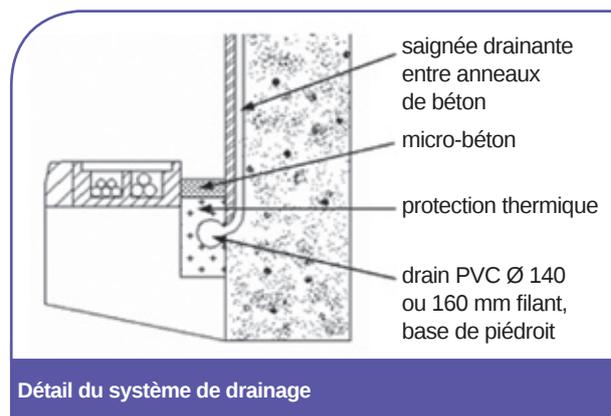
Travaux réalisés de nuit, sous circulation en voie unique (à cause de la densité de trafic importante).

Tranche ferme : du 10/1994 au 06/1995

Tranche conditionnelle : du 09/1995 au 04/1996

Modifications intervenues :

- élargissement des saignées des joints transversaux de 60 mm à 100 mm ;
- remplacement du collecteur longitudinal Ø 200 mm prévu, en Ø 140 mm et Ø 160 mm ;
- création de tabourets au droit de chaque saignée.



Prix du marché pour les 2 tubes :

(les prix suivants incluent la main d'œuvre)

Profilés type PRT 600 : 72 €/ml, pour 2 130 ml (y/c saignées 60 x 100 mm, forages d'appel, barrettes en acier inox)

Profilés type PRT 1000 : 79 €/ml, pour 1 020 ml (y/c saignées 100 x 100 mm, forages d'appel, barrettes en acier inox)

Profilés en polystyrène HD : 113 €/ml, pour 300 ml (y/c saignées 120 x 150 mm, mortier hydrofuge sans retrait, tôles galvanisées)

BILAN DES TRAVAUX

Bilan financier : non disponible au CETU

Bilan technique : les points délicats conduisant à des défauts et par conséquent à des fuites dans certains drains PRT sont :

- les reprises de sciage pour une même saignée ;
- les épaufrures faites sur les bords de saignée lors du dégagement au burin pneumatique après sciage ;
- le désaffleurement entre deux anneaux (défaut du revêtement) : le rattrapage réalisé avec du béton projeté n'est pas satisfaisant, les drains sont biais, ce qui favorise les fuites ;
- l'interruption de tous les drains PRT dans la zone de clé (ils ne pouvaient pas être mis en une seule fois). Cette interruption dans la continuité du drain favorise des fuites dans cette zone.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Constataions faites en 2002

Les travaux de drainage ont bien assaini l'intrados du revêtement en béton.

Quelques fuites persistent sur certains joints équipés de profilés PRT et dans des fissures non traitées. Celles-ci sont régulièrement injectées par des résines aqua-réactives, mais de nouvelles fissures suintantes apparaissent chaque année.

Les drains longitudinaux en base de piédroit, qui reçoivent les eaux drainées dans les saignées, doivent être curés régulièrement.

Les défauts du béton de revêtement localisés de part et d'autre des joints ont été réparés.

Le tunnel est dans un bon état de stabilité.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Les drains PRT et PHD présentent des défauts mais ils ont réduit les venues d'eau qui gênaient l'exploitation dans le tunnel.

Les travaux se sont déroulés pendant l'hiver, ce qui a gêné leur bonne réalisation à cause du gel. Les travaux de drainage en réparations d'ouvrage sont à faire de préférence en période sèche et tempérée.

Les profilés PRT 60 placés dans des saignées de 60 mm de largeur ne permettent pas de loger dans leur emprise le tracé du joint d'anneau de revêtement, s'il n'est pas parfaitement vertical. Il est préférable d'utiliser des profilés PRT 100 car une largeur de saignée de 100 mm englobe plus facilement le tracé du joint.

Lorsque le terrain traversé par le tunnel est un terrain rocheux et lorsque le revêtement en béton est globalement étanche en dehors de quelques fissures, il n'est pas recommandé de faire des forages d'appel en fond de saignée.

En effet dans ce type de terrain, il existe peu de chance de recouper des arrivées d'eau et de réduire significativement les débits dans les autres fissures non traitées (cf. fiche de cas du tunnel de Montcenis). C'est le cas au tunnel du Rond Point où de nouvelles fissures humides apparaissent dans le temps.

Dans les revêtements en béton, les réparations plus récentes (Tunnel de Rive de Giers en 2003), les saignées PRT ne comportent pas de forage d'appel.

En conclusion les saignées PRT présentent fréquemment des défauts d'étanchéité sur les côtés. Pour ce type de traitement de joints de bétonnage présentant des arrivées d'eau, on recommanderait aujourd'hui d'exécuter des saignées telles que celles mises en œuvre dans le tunnel du col de Menée (cf. fiche de chantier éponyme).

GRAND TUNNEL DU CHAMBON

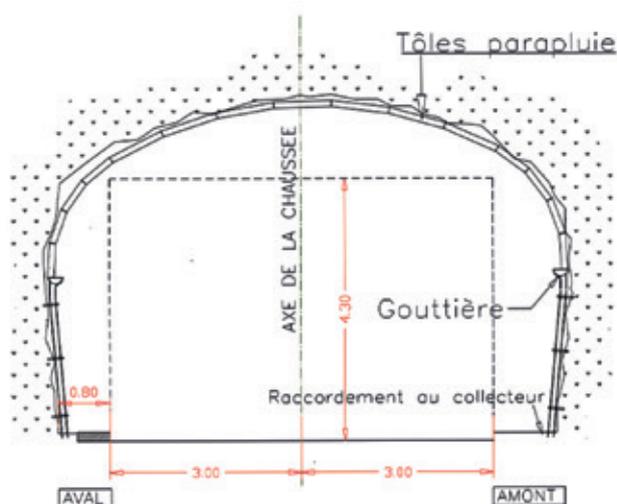
TRAVAUX EN 1998 : TRAITEMENT DES VENUES D'EAU PAR TÔLES PARAPLUIE



Tête côté Mizoën

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1934-1935
- **LOCALISATION** : RD 1091, Isère (38)
- **ALTITUDE** : 1 064 m (tête Nord) à 1 066 m (tête Sud)
- **LONGUEUR** : 756 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN TRAVERS** :
 - voûte en « anse de panier »
 - largeur entre pénédroits : 7,80 m (revêtu) à 9 m (non revêtu)
 - largeur roulable : 6 m après travaux
 - trottoirs : 1 m (amont) et à 0,80 m (aval)
 - gabarit autorisé : 4,30 m
 - le tunnel présente des zones revêtues en béton coffré ancien, d'autres en béton projeté, d'autres en maçonnerie, d'autres en béton armé et enfin des zones non revêtues



SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de 7 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1975, 1979, 1982, 1991, 1996, 1999 (point zéro après les travaux de 1998) et 2005.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

En 1989 : 5 tranches de travaux urgents sont hiérarchisées, dont la remise en état du système d'étanchéité par plaques parapluie « fibro-ciment » existant dans certaines zones humides du tunnel. Pour des raisons budgétaires, seules les deux premières urgences ont été retenues.

Travaux de 1993 : suite à l'inspection détaillée de 1991, les premiers travaux d'urgence sont réalisés (consolidation de la tête amont, réfection de la chaussée et de l'assainissement, réparation des trottoirs).

APROA 1994 : pour un montant total de 5,8 MF TTC, il est prévu divers travaux de confortement, le remplacement ponctuel (voire total si possible) des plaques parapluie « fibro-ciment » et la réfection de l'éclairage. La hauteur libre minimale existante (soit 4,30 m) doit être maintenue.

Inspection détaillée de 1996 : faute de crédits suffisants, les travaux prévus à l'APROA de 1994 n'ont pas été réalisés. Une nouvelle inspection détaillée permet d'actualiser le diagnostic pour préciser les travaux à venir.

Travaux de 1998 : les travaux sont décrits ci-après. Ils comportent notamment la reconstruction d'un anneau bétonné ainsi que le remplacement d'anciennes plaques fibro-ciment par des tôles dites « parapluie ».

Inspection détaillée de 1999 : elle fait office de « point zéro » après les travaux de 1998.

Inspection partielle de 2004 : la présence d'une fissure ouverte en rein aval entre les PM 60 et 68 est détectée. Ce désordre localisé a été traité en 2005.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Conclusions de l'inspection détaillée de septembre 1996 :

- humidité forte sur le trottoir et le bord de chaussée côté amont, due à de nombreuses venues d'eau, dont les plus importantes sont très ponctuelles (en piédroit ou naissance amont, entre les PM 67 et 116) ;
- la voûte parapluie, constituée de plaques en amiante-ciment, est située à la fois sur des zones revêtues de béton coffré d'origine et sur des zones non revêtues. Antérieure à 1976, elle est dans un état de délabrement avancé. Cette situation explique l'humidité de la chaussée dans certaines zones. On constate la disparition ou l'arrachement en rein aval de certaines plaques (désordres dus au passage des poids-lourds). On observe aussi des plaques instables, flottantes, ou surchargées de débris

de roches ou de béton, qui présentent un réel danger pour l'usager. La structure porteuse de la voûte parapluie est très corrodée et les gouttières et conduits d'évacuation sont absents ou non raccordés au réseau d'assainissement existant ;

- l'altération de 3 anneaux de béton ancien (61 ml) s'aggrave, ces zones nécessitent une réparation urgente ;
- la sortie aval du tunnel présente des instabilités (plaques d'enduit de ciment décollées).

Le tunnel est situé à un peu plus de 1 000 m d'altitude. Il y a un risque de gel de l'eau qui forme du verglas sur la chaussée et des stalactites en voûte. Selon l'exploitant, le gel est fréquent sur 100 m dans le tunnel depuis les têtes lorsque la température extérieure atteint -10°C .

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Préconisations de la Centrale d'Inspection du CETU suite à l'inspection détaillée de 1996 :

Pour les sections non revêtues (220 m), une solution de revêtement avec drainage ne s'impose pas puisque le rocher est stable ; seules des purges sont préconisées dans certaines zones.

Les travaux à effectuer en priorité 1 sont liés à la sécurité des usagers. Dans cette optique, il faut déposer les plaques

présentant un danger (risque de chute) et réparer les anneaux de béton (boulons, treillis soudé et béton projeté). Le captage des venues d'eau et le remplacement des plaques sont classés en priorité 2.

Coût de la solution proposée (voûte parapluie) :

50 F/m² pour la dépose et 500 F/m² pour la fourniture et la pose des nouvelles tôles.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

APROA modificatif 1998 : l'objectif identifié est la mise en place d'un éclairage neuf sur un Génie Civil rénové. Des travaux sont prévus dans le tunnel pour un montant de 1,2 MF TTC, sachant que la tête amont est stabilisée (suite aux travaux de 1993) et que le coût de l'éclairage est pris en charge par EDF.

Contraintes de circulation pour les travaux :

- coupure de nuit (sauf les week-ends : alternat) et alternat possible de jour. Il est prévu que les travaux se déroulent en postes de nuit ;
- gabarit à libérer pendant les travaux : 3,50 m (largeur) x 4,10 m (hauteur), le jour comme la nuit.

Avis IGOA le 26/02/98 : approbation de l'APROA, en y ajoutant un prolongement des tôles parapluie dans certaines zones (avec déroctage pour maintien du gabarit).

Février 1998 : élaboration du DCE

Consistance des travaux :

- réparations de zones bétonnées (5 zones, 25 ml au total) ;
- reconstitution de l'anneau de béton des PM 89 à 96 ;

- dépose et remplacement de toutes les plaques « fibro-ciment » parapluie ;
- captages des eaux en piédroits amont (PM 65 à 80, 93 à 100, 116) ;
- purges de zones non revêtues et de zones en béton coffré d'origine ;
- vérification du maintien de la hauteur libre minimale de 4,30 m.

Février/Mars 1998 : appel d'offres

MARCHÉ ET TRAVAUX

Date du marché : 7 mai 1998

Montant du marché : 327 800 € TTC

Mandataire : Sotrabas

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX

La fin des travaux est prévue le 8 juillet 1998. Le retard pris par l'entreprise ne permettant pas d'achever les travaux à la date prévue, le chantier a été interrompu pour la période estivale, du 3 juillet au 7 septembre 1998.

Les tôles parapluies nouvelles ont été posées aux mêmes emplacements que les anciennes ; sauf sur une zone de 5 m qui a été déplacée des PM 140 à 145 aux PM 50 à 55 dans une zone de venues d'eau permanentes.

● CONDITIONS D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

Dépose des plaques parapluies anciennes :

La présence d'amiante dans les plaques parapluies en Fibrociment implique l'application de consignes de sécurité particulières pour leur dépose, ainsi que l'obtention d'une autorisation des services administratifs. Les travaux de dépose des plaques ont été interrompus par décision du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité jusqu'à présentation par l'entreprise d'un dossier précisant la procédure de dépose.

Pose des nouvelles tôles parapluies :

Elle se déroule en plusieurs phases :

- mise en place et fixation par boulonnage des cintres de support des tôles (ils sont positionnés précisément grâce à des consoles munies de butées). Il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas de vides derrière le revêtement ou, au besoin, prévoir des boulons plus longs (longueur déterminée sur chantier) ;
- répartition des lisses de support de tôles sur les cintres. Les lisses relient les cintres entre eux et l'ensemble forme une ossature supportant les tôles ;
- montage des tôles : on commence par suspendre les tôles de clé en dessous des lisses, puis on descend le long de la paroi d'un côté puis de l'autre. Les tôles sont fixées sur les lisses par boulonnage.

La pose des tôles et de leur ossature a duré 25 jours ouvrés en deux postes de nuit.

Réduction de la largeur roulable :

Des levés profilométriques ont été effectués dans le tunnel. Ils révèlent que des déroctages ponctuels sont nécessaires pour obtenir une hauteur libre minimale de 4,30 m sur toute la longueur de l'ouvrage. La mise en place de tôles sans déroctage engagerait cette hauteur libre minimale et ne permettrait pas la circulation de poids-lourd sans risque d'endommagement.

Pour réduire l'importance de l'alésage du tunnel existant, la largeur roulable a été diminuée de 6,50 m à 6 m en augmentant la largeur d'un trottoir.



Après la pose des tôles

BILAN DES TRAVAUX

Les travaux devaient durer deux mois et se terminer avant juillet pour le passage du tour de France. La quasi totalité était réalisée à cette période. Cependant le chantier a dû être repris au mois de septembre pendant deux semaines, pour achever la pose des tôles parapluie.

Le bilan financier n'a pas été communiqué.

Les tôles parapluie de voûte protègent la chaussée des égouttements directs en provenance de la voûte mais n'empêchent pas leur ruissellement sur le rocher de l'excavation jusque sur les trottoirs.

Le système d'évacuation des eaux collectées par les tôles de voûte, par chéneaux et tuyaux de descente (photo page ci-contre), est exposé au gel et aux chocs du trafic. L'entretien du système sous circulation alternée est délicat.

SUIVI DE L'OUVRAGE

L'inspection détaillée de l'ouvrage rénové a eu lieu en septembre 1999 (nouveau point zéro).

Cette inspection a constaté un bon état général de l'ouvrage.

En résumé :

- dans les zones traitées, le système de drainage mis en place en voûte fonctionne bien ;

- la chaussée est humide dans certaines zones qui auraient mérité elles aussi d'être équipées de tôles parapluie ;
- l'eau s'écoule le long des piédroits car elle n'est pas récupérée correctement par les gouttières placées aux points bas des tôles. Cette eau arrive sur le trottoir et peut former des flaques au bord de la chaussée, qui présente par ailleurs des défauts de pente entre deux avaloirs.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

L'exploitation du tunnel est rendue plus délicate à cause de la réduction de la largeur roulable due à la mise en place de tôles parapluie. Il aurait été préférable d'alésier le tunnel pour loger les tôles afin de ne pas réduire la capacité de l'ouvrage.

L'arrêt des tôles en voûte nécessite un dispositif de collecte des eaux (chéneaux et descentes) qui augmente l'encombrement du système, le fragilise par rapport au gel et aux chocs et n'est pas pleinement efficace.

Il est préférable de descendre les tôles parapluie jusqu'au niveau des trottoirs et de collecter les eaux dans des caniveaux d'évacuation.

Les économies qui ont été réalisées sur les travaux de réparation du tunnel (en limitant l'alésage qui eut permis de conserver la largeur roulable existante, en ne prolongeant pas l'habillage en tôle jusqu'aux trottoirs et en évitant la construction de caniveaux d'évacuation) sont la cause de difficultés d'exploitation et de réduction de capacité de l'ouvrage.

Si c'était à refaire d'autres solutions plus pérennes mais aussi plus longues à réaliser et plus coûteuses seraient aujourd'hui mieux explorées (alésage de l'ouvrage, étanchéité par géomembrane ou projetée, protégée par un béton projeté ou coffré).

TUNNEL DE MONTCENIS

TRAVAUX EN 1999 : TRAITEMENT DE JOINTS HUMIDES PAR PROFILÉS DRAINANTS PRT

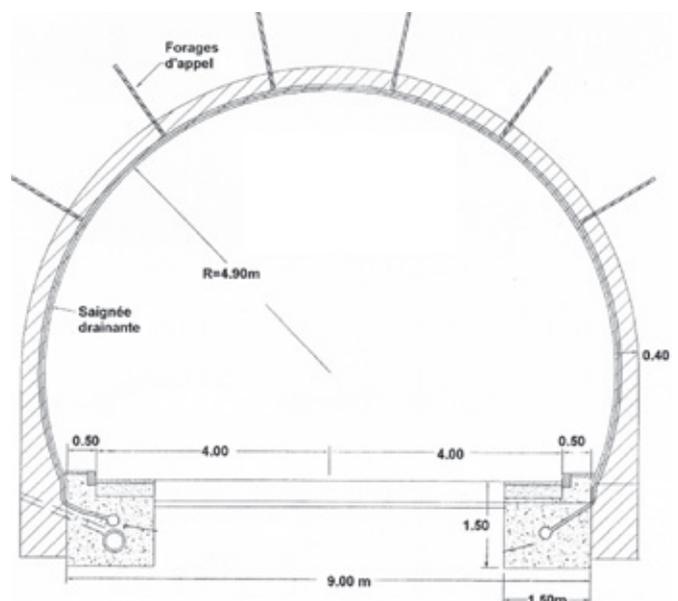


Tête Est (côté Châlon)

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1974-1975
- **LOCALISATION** : RD 680, Saône-et-Loire (71)
- **MAÎTRE D'OUVRAGE** : DE 71
- **ALTITUDE** : 425 m
- **LONGUEUR** : 92 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** :
 courbe de rayon 600 m (PM 0 à 61.14)
 puis alignement droit (PM 61.14 à 91.5)
- **PROFIL EN LONG** : pente moyenne 4 % vers l'Est
 Profil en travers :
 - voûte de 4,90 m de rayon centrée à 1,90 m de hauteur
 - largeur entre piédroits : 9 m (à la base)
 - développée de la voûte : environ 20 m
 - largeur roulable : 2 voies de 3,50 m + 2 bandes dérasées de 0,50 m
 - trottoirs : 2 x 0,50 m
 - gabarit autorisé : 4,60 m
- **SOUTÈNEMENT** : cintres HEB 180 + béton projeté sur treillis soudé (15 cm) en demi-section supérieure
- **ÉTANCHÉITÉ** : aucune

- **REVÊTEMENT** : béton coffré armé
 - épaisseur : 40 cm en voûte et 80 cm en piédroits
 - espacement des joints entre anneaux : 4,50 m
- **DRAINAGE** : captages ponctuels avant revêtement
- **CHAUSSÉE** : refaite en 1990



SURVEILLANCE

Le tunnel a fait l'objet de 4 inspections détaillées effectuées par le CETU en 1982, 1989, 1994 et 2000 (après les travaux de 1999).

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Le tunnel de Montcenis a été construit en 1974. L'ouvrage est situé en site périurbain et se caractérise par la présence de constructions sur sa couverture et une faible épaisseur de recouvrement (4 à 13 m). Ces contraintes fortes ont nécessité de limiter les vibrations lors des tirs de mines notamment en creusant le tunnel par demi-sections successives.

Cette méthode consiste à exécuter le déroctage de la ½ section supérieure puis celui de la ½ section inférieure après la réalisation du béton de revêtement de la ½ section supérieure. Le tunnel n'a pas été étanché à la construction.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

L'inspection détaillée de 1982 a mis en évidence des venues d'eau en voûte au niveau des joints transversaux de bétonnage entre anneaux. Ces venues d'eau apparaissent plus importantes sur la demi-voûte nord. Par temps froid des stalactites se forment en voûte au niveau des joints. La position des stalactites a permis de localiser les joints à traiter. On relève une présence d'humidité presque systématique à la jonction piédroits / voûte. Ce défaut résulte du mode d'excavation du tunnel en deux étapes : d'abord par la demi-section supérieure (voûte) puis en excavant la ½ section inférieure (piédroits). Cette méthode implique une reprise en sous-œuvre du revêtement de voûte, qui laisse un joint longitudinal sur chaque piédroit dans le revêtement de l'ouvrage.

En 1994, d'autres désordres sont constatés. Les **joints transversaux** des anneaux de revêtement présentent

localement des décollements des ragréages de finition. Il y a donc un risque de chutes de débris de mortier sur la chaussée.

Les **joints longitudinaux de reprise** piédroits/voûte, systématiquement ragrésés, sont altérés : l'humidité provoque le décollement du ragréage aux intersections avec les joints verticaux. On constate que tous les joints de voûte sont affectés par les venues d'eau, sur une longueur comprise entre 10 et 100 % de la développée. Le risque de gel de l'eau sur la chaussée impose de régler le problème des venues d'eau.

Le système d'assainissement de la RD 984 (au-dessus de la tête Est du tunnel) pose problème : des ruissellements aux PM 6 et 10 sont manifestement liés aux arrivées d'eau en provenance de la RD qui passe au-dessus du tunnel.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Une solution est proposée dès 1990 dans le rapport d'inspection détaillée : il s'agit de la mise en place sur chaque joint de bétonnage d'un profilé en caoutchouc synthétique (EPDM), amovible, dans une saignée réalisée à la scie mécanique (joint type PRT de Phœnix). Cette solution a été choisie à cause du caractère localisé des arrivées d'eau au droit des joints verticaux de reprise de bétonnage d'anneaux de revêtement.

En 1994, les actions de réparation à entreprendre suivantes sont préconisées dans la nouvelle Inspection Détaillée :

- nettoyage et amélioration de l'assainissement au-dessus de la tête Est ;
- drainage des joints de bétonnage (260 ml sur 380 ml sont très humides) par la mise en place de profilés drainant (type PRT). La bonne qualité du béton est favorable à l'obtention de saignées régulières et propres. Ceci est nécessaire pour une bonne étanchéité du joint PRT dans la saignée.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

Deux propositions sont faites dans le dossier d'appel d'offres :

- proposition n°1 : coupure totale de la circulation, délai d'exécution 1 mois ;
- proposition n°2 : travaux hors circulation avec rétablissement obligatoire de la circulation deux jours par semaine, délai d'exécution 2 mois.

Dimensions retenues : 60 mm de largeur et 100 mm de profondeur. On utilise une scie à béton à trois lames parallèles, puis on repique le béton entre les traits de scie. Il faut soigner le sciage pour avoir des bords francs et lisses permettant un contact étanche avec les profilés qui sont entrés en force dans la saignée.

● DESCRIPTION DES TRAVAUX ENVISAGÉS

Drainage longitudinal : réalisation d'une tranchée de 1,50 m x 1,50 m de part et d'autre de la chaussée, puis pose des drains raccordés aux regards existants ou à construire.

Réalisation des saignées (par sciage mécanique) au droit des joints de dilatation entre anneaux bétonnés

Forages d'appel : ils sont prévus en voûte, en fond de saignées. De diamètre 36 mm, ils sont réalisés sur environ un mètre de longueur et sont équipés de drains PVC cannelés et crépinés de diamètre 30 mm. Les forages sont implantés tous les 2 mètres environ sur la développée de la saignée.

Les éventuels forages en piédroits sont identiques aux forages d'appel situés en voûte.

Équipement des saignées par profilés spéciaux caoutchouc synthétique (EPDM) de type Phœnix PRT 100 : les profilés PRT sont entrés en force dans les saignées, le caoutchouc est ainsi comprimé pour éviter les fuites d'eau entre le profilé et les flancs du sciage de la saignée. Les profilés sont raccordés aux drains longitudinaux PVC 200 mis en place en base des piédroits. Le raccordement se fait par tubes PVC de diamètre 80 mm. Des barrettes de fixation sont chevillées tous les 2 m le long du développé des profilés afin de les maintenir notamment si un épisode de gel intense faisait qu'ils puissent être repoussés vers l'intérieur du tunnel par le gel des eaux drainées.

Le tunnel comporte 19 joints de bétonnage à drainer. Chacun d'entre eux comporte 6 forages d'appel, soit un total de 114 forages d'appel auxquels il faut ajouter des forages en piédroits si nécessaire.

MARCHÉ ET TRAVAUX

Date du marché : 29 septembre 1999

Montant du marché : 950 070 F HT (144 916 €) dont 345 000 F HT pour le drainage des joints, 50 000 F HT pour les forages d'appel et 67 850 F HT pour le drainage longitudinal en base des piédroits.

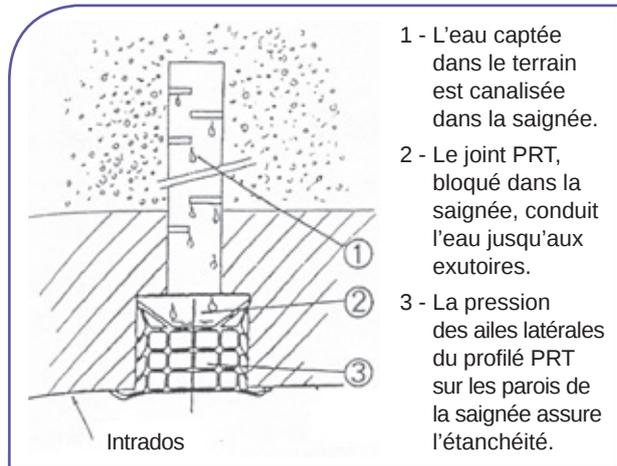
Mandataire : NOUVETRA

Date des travaux : du 25 octobre au 10 novembre 1999 pour le drainage des joints (proposition 1 : coupure totale de la circulation pendant les travaux).

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Le compte-rendu de la réunion de départ du chantier donne des précisions sur certains points techniques.

Après exécution d'un essai de saignée de 60 mm de largeur, il apparaît que l'emprise de la saignée ne permet pas d'englober la totalité du tracé du joint de bétonnage existant. Le risque de fuites étant important dans ce cas, il a donc été décidé d'exécuter des saignées de 100 mm de largeur et de les équiper avec des profilés PRT 100.



Technique retenue

Par ailleurs d'autres prescriptions techniques sont arrêtées :

- pour avoir un raccordement rectiligne, les saignées seront réalisées de bas en haut sur une demi-voûte et de haut en bas sur l'autre ;
- il est important d'assurer la continuité du joint en clé de voûte, les saignées devraient permettre la mise en place du PRT en un seul élément ;
- si le profilé ne couvre pas la totalité de la longueur de la saignée, un raccord sera admis en piédroits (aucun raccord n'est autorisé en voûte au-dessus de la chaussée) ;
- il existe un risque de rencontrer des cintres lourds du soutènement au droit de joints à traiter ; les forages d'appel seront alors réalisés en biais ;
- certains joints ne sont pas traités en voûte. Dans ce cas les saignées réalisées en piédroits sont équipées avec des profilés de 60 mm de largeur (7 au total). Un forage d'appel est à réaliser en tête de chacune de ces saignées supplémentaires.



Sciage d'une saignée



Travaux terminés

BILAN DES TRAVAUX

Les travaux de 1999 ont conduit à la mise en place de profilés drainants PRT100 dans tous les joints de bétonnage entre anneaux de revêtement.

Le coût définitif de la rénovation a été de 1 150 000 F TTC (175 572 €).

Les archives de l'opération montrent que la scie à béton utilisée pour réaliser les saignées comportait 2 lames et non 3, comme il est recommandé pour faciliter le dégagement des saignées sans en abîmer les bords. Cela pourrait expliquer certaines fuites (au contact entre les bords des profilés PRT et les flancs des saignées) constatées lors de l'inspection faite après les travaux.

SUIVI DE L'OUVRAGE

La dernière inspection de mai 2000 avait pour principal objectif de dresser un état de l'ouvrage après rénovation et d'évaluer l'efficacité des dispositifs mis en place.

Sur les joints connus pour être les plus humides, il y a toujours formation de glaçons, mais de taille réduite, et qui posent moins de problèmes d'exploitation.

On observe tout de même des tâches humides sur l'intrados, côté nord, en bordure de joints. Les lèvres des joints PRT plaquant bien sur le béton, on peut penser que cette humidité résiduelle provient pour partie de l'imprégnation du béton ressortant au-delà de l'emprise du joint.

Les fuites qui se manifestaient sur le joint même ont été traitées ponctuellement en ragréant la saignée le long des lèvres.

Un point reste à surveiller : la partie basse du profilé, scellée par l'enrobé du trottoir, peut s'engorger au fil du temps et provoquer une remontée d'eau. Il aurait été plus sûr de construire des regards en pied des profilés.

On constate une humidité locale du trottoir provoquée par 8 joints côté nord.

Le réseau d'assainissement de la RD 984 qui passe côté nord au-dessus du tunnel semble toujours engorgé.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Les profilés PRT 60 placés dans des saignées de 60 mm de largeur ne permettent pas de loger dans leur emprise le tracé du joint d'anneau de revêtement s'il n'est pas parfaitement vertical. Il est préférable d'utiliser des profilés PRT 100 pour une largeur de saignée de 100 mm.

Pour améliorer l'exhaure des eaux drainées en pied des saignées, il aurait été préférable de renvoyer les eaux vers le collecteur général et de faire des petits regards sur le trottoir à la base de chaque saignée.

Les forages d'appel d'eau en fond de saignées ne sont pas recommandés dans le cas d'un revêtement en béton peu fissuré. Ils risquent d'augmenter les arrivées d'eau. Dans les réparations plus récentes de revêtements en béton, les saignées PRT ne comportent plus de forages d'appel (tunnel de Rive de Giers, 2003).

Au contraire dans un revêtement en maçonnerie, le cheminement des eaux est réparti vers les nombreux joints d'assemblage de la maçonnerie. Dans ce cas, on peut espérer que les forages d'appel dirigent une forte partie des eaux vers les saignées.

Plusieurs tunnels similaires (revêtement en béton coffré et arrivées d'eau au niveau des joints entre anneaux) traités comme le tunnel de Montcenis présentent localement des fuites au contact profilés PRT/bords des saignées.

Il ne serait plus recommandé de drainer les joints d'anneaux avec des profilés EPDM de type PRT. On préférerait des saignées comme celles mises en place dans le tunnel du col de Menée (cf. fiche de chantier éponyme).

TUNNEL DE LA GIETTAZ (anciennement tunnel des Aravis)

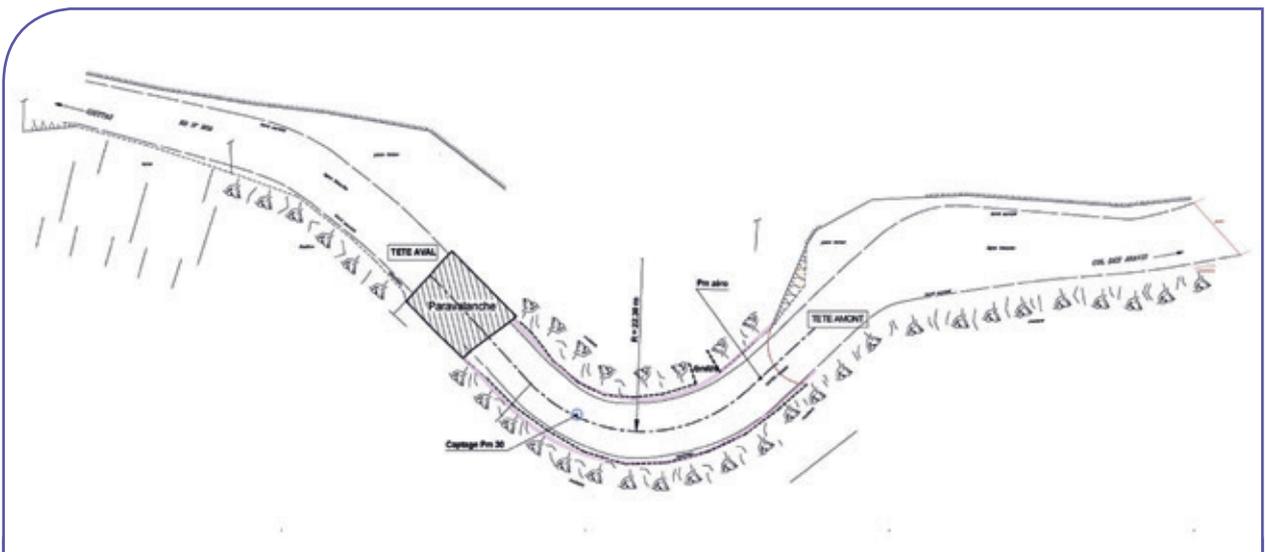
TRAVAUX EN 2001 : ÉTANCHEMENT ET REVÊTEMENT PAR COQUE INDÉPENDANTE EN BÉTON PROJETÉ



Avant / Après travaux

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : années 1900
 - **LOCALISATION** : RD 909, Savoie (73)
 - **ALTITUDE** : 1 400 m
 - **CLIMAT** : montagne
 - **LONGUEUR** : 52 m (+ cadre béton armé de 11 m)
 - **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
 - **TRACÉ EN PLAN** : rayon de 23 m
 - **PROFIL EN LONG** : déclivité de 7,5 %
- Profil en travers :
- brut de déroctage pour la partie tunnel
 - cadre paravalanche de 4,40 m x 7,50 m (à l'aval)
 - gabarit : 4,40 m
 - largeur roulable : 6,50 m (au minimum)



Tracé en plan

SURVEILLANCE

Deux inspections ont été réalisées par la centrale d'inspection du CETU en 1976 et 1996. Une inspection détaillée a été réalisée par la SNCF Ingénierie en 2010. Une inspection détaillée a été réalisée par Géolithe en 2017.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Des travaux d'entretien et de réparation ont été effectués en 1977 (purges, boulonnage, grillage)

Un paravalanche de type cadre en béton armé a été réalisé en tête amont en 1981 sur une longueur de 11 m, après un reprofilage par alésage du tunnel.

Une Étude Préliminaire d'Ouvrages d'Art a été produite par le CETU en août 2000 à la demande du CG 73. L'étude a été réalisée à partir des inspections et de nouveaux éléments topographiques (levé en plan de l'ouvrage et profils en travers du tunnel par profilométrie laser tous les 5 m).

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Les principales conclusions des inspections ont été les suivantes :

- des instabilités rocheuses en voûte sont liées à la décompression de la roche laissée brute ainsi qu'aux effets de l'humidité et du gel. La voûte garde néanmoins une bonne stabilité d'ensemble ;
- des instabilités à l'extérieur du côté tête amont (col des Aravis) avec des masses rocheuses assez importantes menacent la chaussée ;

- d'importants débits d'eau en voûte au PM 30 occasionnent des chandelles de glace en hiver qu'il faut casser très souvent (la subdivision signale 100 jours de gel par an sur le site du tunnel) ;
- l'excavation est humide dans sa totalité en période pluvieuse.

Les travaux à prévoir concernent la protection de la tête amont, la purge des zones instables en tunnel et le traitement des venues d'eau sur toute la longueur de l'ouvrage.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Les travaux de 1981 décrits ci-dessus pour l'amélioration du gabarit du tunnel ont comporté une légère rectification du tracé en plan du virage pour permettre le croisement d'une voiture et d'un car dans le tunnel. À l'extérieur la visibilité d'une tête à l'autre est possible dans chaque sens de circulation, avant de s'engager en tunnel. Cette possibilité permet aux cars de pouvoir éviter de se croiser dans l'ouvrage.

Compte tenu des impossibilités de déviation, une circulation en alternat est imposée au chantier.

Les solutions envisagées pour étancher le tunnel entre le paravalanche créé en 1981 et la tête amont ont été :

- la mise en place d'une étanchéité traditionnelle protégée soit par un béton coffré soit par des éléments préfabriqués en béton armé ;

- la mise en place de tôles parapluies combinées à un système d'assainissement et de drainage ;
- la réalisation en voûte d'une coque indépendante d'étanchement-revêtement en béton projeté reposant sur des piédroits en béton armé.

La solution par coque indépendante en béton projeté a été finalement retenue essentiellement pour ses possibilités d'adaptation au virage très serré, sa souplesse de mise en œuvre qui permet un trafic routier réglementé pendant les travaux, la possibilité d'approvisionnement en continu de béton pour une projection par voie sèche en silos, et enfin, son efficacité à la fois contre les venues d'eau et le gel. Par ailleurs cette solution permet de construire, également sans coffrage, une casquette de protection de la tête amont.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

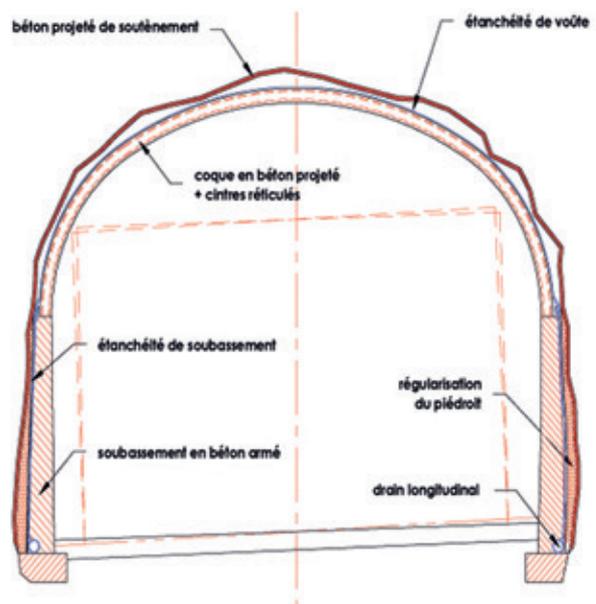
Le DCE a été réalisé suivant les conclusions de l'étude préliminaire. Il a été achevé en avril 2001.

La technique d'étanchement-revêtement par coque indépendante en béton projeté armé est décrite dans la note d'information du CETU n°15.

Les difficultés de construction de la coque indépendante pour cet ouvrage sont liées à sa mise en œuvre dans un virage très serré (rayon de 23 m).

Les travaux prévus comprenaient :

- le drainage des eaux et l'assainissement du tunnel, dont le captage d'une importante source en piédroit côté montagne ;
- l'alésage de réglage et le soutènement de l'excavation par boulons d'ancrage à scellement continu et béton projeté ;
- la réalisation de piédroits en béton coffré ;
- la mise en œuvre d'une étanchéité ;
- la réalisation d'une voûte indépendante en béton projeté armé ;
- la réalisation d'une casquette en tête amont.



MARCHÉ ET TRAVAUX

Les travaux de réhabilitation du tunnel des Aravis ont été financés par le Conseil Général de Savoie.

Date du marché : 30 juillet 2001

Montant du marché : 390 070 € TTC

Mandataire : FREYSSINET

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX EN 2 TRANCHES

- La première – tranche ferme – a débuté le 3 septembre 2001 par l'alsage ponctuel de l'excavation rocheuse au droit des zones sous-excavées pour loger la coque de revêtement. L'excavation a été ensuite confortée par un soutènement en béton projeté associé à un treillis soudé et des boulons d'ancrage. L'arrivée d'eau permanente (source) du PM 30 a été captée et renvoyée vers le collecteur général Φ 300 du tunnel construit pendant cette phase de travaux. Cette première tranche a pris fin le 6 novembre 2001.
- La deuxième – tranche conditionnelle affermie – a commencé en mars 2002. Elle consistait à réaliser le reprofilage de la chaussée, les piédroits, l'étanchéité de voûte et la coque en béton projeté armé ainsi que la casquette de la tête amont. Cette tranche a été divisée en deux périodes encadrant la saison estivale, du 25 avril au 2 juillet 2002 et du 11 septembre au 3 octobre 2002.

● EXÉCUTION DES TRAVAUX

Alésage et confortation

L'alsage a été exécuté au brise-roche hydraulique. Un captage a été réalisé au PM 30 pour capter l'importante venue d'eau côté montagne.

Un gabarit métallique permettait de vérifier en continu la conformité de l'excavation au profil théorique.

Après la pose des boulons et du treillis soudé, le soutènement de l'excavation a été complété par une couche de béton projeté de 10 cm en moyenne.

Réalisation et étanchéité des piédroits

Dans l'emprise des piédroits, le soutènement est complété par du béton projeté pour obtenir une bonne planéité du support avant la pose du complexe d'étanchéité composé :

- d'une nappe drainante (Delta MS)
- d'un complexe d'étanchéité en mousse réticulée étanche (20 mm d'épaisseur) thermo-soudée à une géo-membrane d'étanchéité complémentaire d'un côté et à un géotextile de protection de l'autre.

Un drain est placé en base de l'étanchéité de chaque piédroit pour évacuer l'eau drainée vers le collecteur général puis hors du tunnel.

Sur proposition de l'entreprise, les piédroits ont été réalisés en béton projeté et non en béton coffré comme prévu au marché en raison de difficultés d'approvisionnement en béton traditionnel.

Pour ceci, une première nappe de treillis a été posée et la projection effectuée jusqu'à la position théorique de la deuxième nappe de treillis ; après la pose de cette seconde nappe, la projection a été poursuivie et achevée par une couche de finition talochée pour obtenir un parement lisse.

Réalisation de la coque

- L'ossature métallique pré-montée à l'extérieur (cintres réticulés à 3 brins + treillis soudé en deux nappes) a été transportée dans le tunnel avec un élévateur. Puis les lés d'étanchéité ont été déroulés sur la chaussée balayée et soudés entre eux avant d'être positionnés sur l'ossature métallique. L'ensemble a été placé sur les piédroits et fixé par boulonnage des platines des cintres sur l'arase supérieure des piédroits.
- Raccordement de l'étanchéité de voûte à celle des piédroits.
- Projection du béton pour constituer la coque de voûte en noyant l'ossature d'acier dans une épaisseur de 15 cm de béton.

Réalisation de la casquette de la tête amont

Cette partie d'ouvrage a été réalisée à l'air libre à partir de l'ossature métallique fixée sur les piédroits et enrobée par une projection de béton. L'étanchéité de voûte a été raccordée à celle des piédroits comme en souterrain.

Raccordement de l'étanchéité de la coque au paravalanche de la tête aval.



Intérieur du tunnel après la pose de l'ossature métallique et avant la projection du béton de revêtement de voûte



Tête amont avant réalisation du bandeau

BILAN DES TRAVAUX

Le montant des travaux est de 406 223 € TTC soit 16 152 € (environ 4 %) de plus que le montant du marché.

La durée effective de travaux a été d'environ 6 mois.

SUIVI DE L'OUVRAGE

L'inspection détaillée complète de l'ouvrage rénové a eu lieu le 22 novembre 2002.

Après les travaux, l'état de la structure de l'ouvrage est considéré comme satisfaisant. Quelques fissurations transversales vraisemblablement liées au retrait ont été relevées.

En revanche, des infiltrations susceptibles d'évoluer sont signalées :

- en tête amont ;
- en piédroit « montagne » entre PM 0 et PM 4 ;

- en piédroit « montagne » au PM 20 ;
- en rein « montagne » PM 26 avec fissure concrétionnée ;
- en rein « montagne » PM 35, et en clé avec venue d'eau ;
- PM 50, à la jonction avec le paravalanche.

L'origine probable est soit un défaut de soudure aux raccords entre lés en voûte, soit une blessure de l'étanchéité.

Dans le tympan du paravalanche existant, une trappe a été réalisée afin de permettre l'accès au-dessus de la coque.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Le gestionnaire est globalement satisfait de son ouvrage réparé : voir photos avant / après en page 44.

Sur une durée de retour de 16 ans, nous constatons que le dispositif de coque indépendante assure toujours une bonne étanchéité de l'ouvrage et que son vieillissement est globalement bon, d'autant qu'il se trouve dans un environnement relativement agressif (montagne).

Il subsiste un défaut de l'étanchéité, au niveau du piédroit gauche, au droit de la jonction de la nouvelle coque avec le paravalanche existant côté aval où quelques suintements sont apparus. Le dispositif pour la continuité de l'étanchéité à la jonction coque / paravalanche serait à modifier.

Les travaux du tunnel de la Giettaz ont montré que le procédé d'étanchement par coque indépendante en béton projeté pouvait être mis en œuvre dans un ouvrage comportant un virage de faible rayon (23 m) et que ce système est pérenne.

TUNNEL DE SISTERON

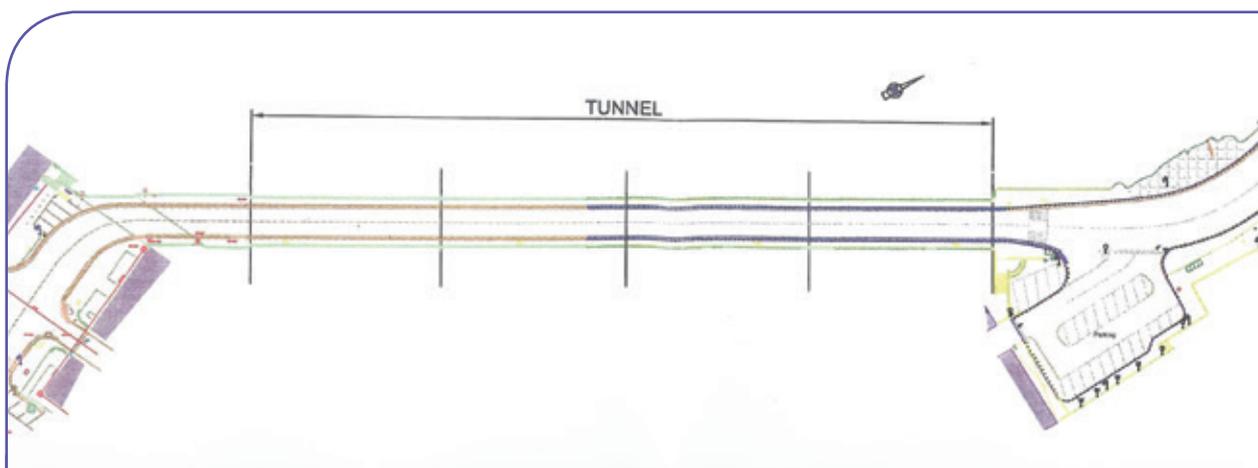
TRAVAUX EN 2003 : TRAITEMENT DE VENUES D'EAU PAR COQUE INDÉPENDANTE
 EN CHEMISAGE DE VOÛTE



Avant / Après travaux

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1955
- **LOCALISATION** : RD 4085, Alpes de Haute-Provence (04)
- **ALTITUDE** : 488 m
- **ENVIRONNEMENT** : urbain
- **LONGUEUR** : 162,50 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN LONG** : rampe 2,2 %
 Profil en travers :
 - voûte en anse de panier
 - largeur entre piédroits : 10,15 m
 - largeur roulable : 7 m
 - gabarit : 4 m



Tracé en plan

SURVEILLANCE

Cinq inspections ont été réalisées par la centrale d'inspection du CETU en 1976 et 2003. L'inspection de 2003 constitue un point 0 suite aux travaux de réhabilitation effectués. Deux inspections ont été réalisées par BOAS en 2012 et 2017.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

À la demande du CETU, des investigations ont été effectuées en 1976 (série de forages destructifs) ainsi qu'un levé profilométrique en 1991.

Un levé topographique de l'ouvrage a été réalisé par l'entreprise SAGE en 1999.

Des travaux d'abaissement (par décaissement) de la chaussée ont été réalisés en 2002.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Les principales conclusions des inspections antérieures aux travaux de réhabilitation ont été les suivantes :

- le génie civil de l'ouvrage évolue peu, sa stabilité est bonne ;
- la principale gêne à l'exploitation de l'ouvrage provient des venues d'eau et de la formation de stalactites de glace en hiver ;

- les venues d'eau arrivent en voûte par les fissures du béton de revêtement et les joints de bétonnage longitudinaux et transversaux.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

L'ouvrage est situé sur l'axe principal de la ville de Sisteron. Pour limiter la gêne des usagers, la réalisation des travaux se fera la nuit, la circulation étant rétablie dans l'ouvrage le jour. Des itinéraires de déviation seront mis en place de chaque côté du tunnel.

Les solutions envisagées pour traiter les arrivées d'eau ont été :

- la réalisation de saignées drainantes (solution ponctuelle) ;

- la réalisation d'un chemisage de voûte par une coque indépendante d'étanchement-revêtement en béton projeté reposant sur des corbeaux en béton armé (solution globale).

Compte tenu de la multiplicité des arrivées d'eau et de leur répartition sur tout l'intrados, la solution par étanchéité totale a été préférée à la solution par traitements ponctuels, jugée insuffisante.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

La technique retenue – étanchement-revêtement par coque indépendante en béton projeté armé – est décrite dans la note d'information du CETU n°15.

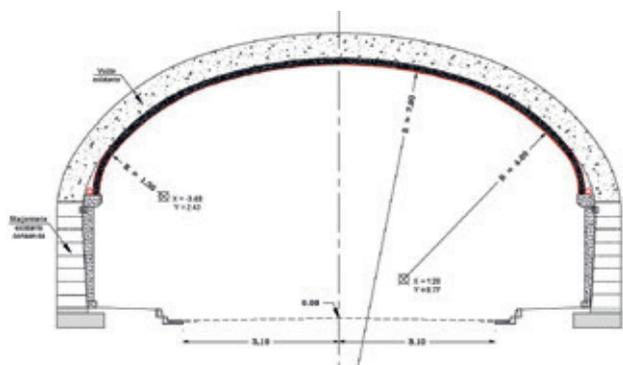
Les particularités pour les travaux de réparation du tunnel sont liées à la forme de la voûte en anse de panier ainsi qu'au fait qu'il fallait conserver les piédroits en maçonnerie, qui constituent un élément important du caractère de l'ouvrage.

Les travaux prévus comprenaient :

- la dépose de l'éclairage existant ;
- l'hydro-sablage de la voûte et des piédroits ;
- la foration et le scellement de boulons pour la fixation des corbeaux ;
- la pose et le boulonnage de corbeaux préfabriqués ;
- la mise en œuvre d'une étanchéité ;
- la réalisation d'une voûte indépendante en béton projeté armé ;
- la réalisation d'un dispositif d'évacuation des eaux drainées ;

- la mise en œuvre de piliers architecturés ;
- la réalisation d'un enrobé sur trottoirs ;
- la mise en œuvre d'une nouvelle couche de roulement sur la chaussée.

L'estimation du coût de la coque en tunnel était de 812 753 € TTC.



MARCHÉ ET TRAVAUX

Les travaux de réhabilitation du tunnel de Sisteron ont été financés par la Direction Départementale de l'Équipement des Alpes de Haute-Provence.

Mandataire : NOUVETRA T.P.

● DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Les travaux de la 2^e phase du génie civil (la 1^{re} phase étant le rabaissement de chaussée réalisé en novembre 2002) se sont déroulés de nuit pour limiter la gêne causée aux usagers. L'installation de chantier s'est faite sur le parking situé à la tête Nord (direction Gap). Cette seconde phase de travaux consistait à réaliser la coque d'étanchement-révêtement en béton projeté armé, qui est posée en appui sur des corbeaux préfabriqués à construire sur les piédroits en maçonnerie.

● EXÉCUTION DES TRAVAUX

Nettoyage et préparation de l'intrados

Après la dépose de tous les équipements, l'ensemble de l'intrados du tunnel ainsi que les murs tympan des têtes ont été hydrosablés.

Construction des corbeaux

Des barres d'ancrage Ø 25 mm et de 1,50 m de longueur ont été scellées à la résine, à raison de trois ancrages par corbeau préfabriqué d'une longueur de 3 m. Une fois le corbeau en place, un serrage à la clé dynamométrique à 5 tonnes a été appliqué sur chaque boulon. Par la suite, un cachetage de mortier blanc a été réalisé sur chaque réservation d'ancrage.

Construction de la coque

La structure porteuse de l'étanchéité est fabriquée par modules transportables à l'extérieur du tunnel. Elle est composée de cintres réticulés Pantex espacés de 1,50 m et entretoisés par des filants longitudinaux Ø 16.

Un treillis soudé ST20 est mis en place à l'extrados de la structure puis vient ensuite le « fond de coffrage » en géotextile (cf. Fiche d'information du CETU n°15).

Une fois le module d'ossature construit, le complexe d'étanchéité est déroulé sur l'extrados. Le complexe est constitué d'une membrane PVC de 2 mm en lès de largeur de 2 m qui sont pré-assemblés en usine aux dimensions des modules d'ossature.

Le module d'ossature est placé sur un camion plateau spécialement équipé, puis transporté dans le tunnel. L'élément est ensuite positionné et plaqué sur l'intrados à l'aide de vérins hydrauliques. D'autres vérins latéraux permettent de maintenir l'ossature resserrée pour l'inscrire dans le gabarit du tunnel. Les modules d'ossature ont été posés du sud vers le nord. Les différents vérins permettent également les réglages nécessaires pour le positionnement fin de la coque sur les corbeaux.

Préalablement à la mise en place des modules à l'intérieur du tunnel, un dispositif de collecte des eaux est réalisé au-dessus des corbeaux. Ce dispositif comprend un drain enveloppé dans une bande longitudinale d'étanchéité qui est fixée sur les corbeaux, de manière à contenir sans fuite les eaux arrivant dans le drain. Après la pose des modules, le complexe d'étanchéité des modules vient derrière la bande longitudinale d'étanchéité. Le raccord longitudinal des deux étanchéités se fait par recouvrement d'environ 50 cm. Transversalement la continuité de l'étanchéité entre les modules est assurée par une double-soudure transversale entre l'étanchéité du module précédemment posé et celle du nouveau module.

Après le raccordement du fond de coffrage, un joint de bétonnage en mousse est placé entre chaque module.

La coque peut alors être réalisée en béton projeté par voie sèche. Le béton est un B30 dosé à 400 kg/m³ adjuvanté afin d'obtenir des résistances de l'ordre de 10 MPa à 24 h. Le mélange sec a été fabriqué en usine et stocké en silos à l'extérieur du tunnel, à 150 m sur le parking de la tête Nord.

La projection a été réalisée en passes successives, réparties de chaque côté de manière à charger l'ossature le plus uniformément possible pour limiter les déformations.

Deux couches de béton sont projetées, la première vient enrober l'intérieur des cintres réticulés et réalise un « gobetis » sur l'ensemble du fond de coffrage. La seconde est projetée après le durcissement de la première. Elle achève la coque en venant compléter son épaisseur entre les cintres.

Une couche d'environ 2 cm de micro-béton blanc a été mise en œuvre pour un traitement esthétique de l'intrados de la voûte en anse de panier.



Pose de la structure armature + étanchéité



Projection du béton sur la structure

BILAN DES TRAVAUX

Bilan financier et délai

Le montant du marché est de 775 416 € TTC (date du marché : 26 février 2003).

La durée des travaux a été de 3 mois (du 3 mars au 5 juin 2003).

SUIVI DE L'OUVRAGE

L'inspection détaillée complète de l'ouvrage rénové a eu lieu le 4 juin 2003.

Après les travaux, l'état de la structure de l'ouvrage est considéré comme bon. Seuls quelques défauts tels que des différences de teintes ou des irrégularités de surface de la coque en béton projeté ont été relevés.

Aucune venue d'eau en voûte n'a été détectée.

Une visite de l'ouvrage ainsi qu'une discussion avec son exploitant ont eu lieu le 3 mai 2018 afin d'apprécier le vieillissement du procédé d'étanchéité mis en œuvre.

La coque principale est en très bon état. Aucune trace d'humidité n'a été relevée. Quelques fissures transversales sont relevées, notamment à proximité des joints entre plots. Ces fissures n'ont pas été reprises par les joints mousse. À noter que le trait de scie réalisé *in fine* entre chaque plot n'a *a priori* pas été assez profond pour atteindre le joint mousse disposé à la construction entre chaque plot de béton.

Des arrivées d'eau ponctuelles au niveau des piédroits maçonnés (non étanchés) sont observées. Elles sont

de faible débit et ruissellent jusqu'au trottoir (pas de dispositif de recueil prévu). Ces arrivées d'eau combinées aux effets du gel conduisent à un délitement de quelques pierres.

Aux points bas des drains sur corbeaux (tête nord), des fuites sont apparentes au niveau du couvercle de fermeture. Ce couvercle (étanché) n'a pas été ouvert lors de notre visite.

Ces fuites sont plus importantes côté piédroit est (tête nord). Leurs traces s'étendent au premier corbeau situé à l'arrière de ce couvercle. On peut supposer que ce couvercle se met en charge et que l'eau s'infiltré ensuite entre le corbeau et le piédroit.

Une explication possible de ces fuites au point bas des drains pourrait être que le même type d'entrée d'eau constatée au niveau des piédroits maçonnés existe sur le piédroit sur la partie comprise entre le corbeau et la fixation de la géomembrane. Ces eaux restent derrière la géomembrane et circulent ensuite sur les corbeaux jusqu'au point bas où elles sont bloquées au point bas par le couvercle de fermeture.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Le gestionnaire est satisfait de la coque d'étanchement-revêtement en béton projeté armé. L'absence d'infiltration permet de préserver totalement les appareils d'éclairage installés. Quelques défauts persistent toutefois, comme des suintements d'eau sur les piédroits, qui proviennent de fuites au niveau des corbeaux. Le système de fixation de la géomembrane sur la voûte mériterait d'être repensé, si c'était à refaire...

Sur l'ouvrage existant, la création de légères cunettes en base de piédroit permettrait de canaliser les eaux d'infiltration provenant des corbeaux et des parties d'ouvrages non étanchées, et de les diriger vers le point bas du tunnel.

La couche de finition avec du ciment blanc s'est très rapidement encrassée et est impossible à nettoyer. Elle apparaît comme un surcoût inutile. Le tunnel n'a plus l'aspect qu'il avait à la réception des travaux...

TUNNEL DU MARQUAIRES (1)

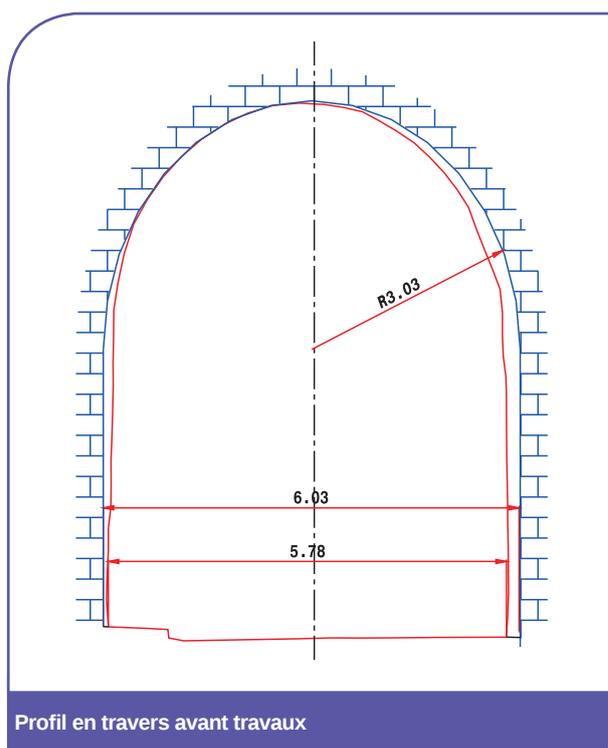
TRAVAUX EN 2003 : ÉTANCHEMENT INTÉGRAL PAR GÉOMEMBRANE ET CHEMISAGE EN BÉTON COFFRÉ D'UNE VOÛTE EXISTANTE EN MAÇONNERIE



Tête côté Gard

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1868 à 1874
- **LOCALISATION** : RD 907 à la limite Lozère / Gard
- **MAÎTRE D'OUVRAGE** : Conseil général de la Lozère
- **ALTITUDE** : environ 970 m
- **LONGUEUR** : 325 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel (2 fois une voie)
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN LONG** : déclivité de 2 % vers Florac
 Profil en travers :
 - voûte plein cintre de 3 m de rayon
 - largeur entre piédroits : 6 m
 - hauteur des piédroits : 4 m
 - largeur roulable : 5 m
 - trottoirs : trottoir unique
 - gabarit autorisé : 4,10 m
- **REVÊTEMENT** : en maçonnerie de moellons granitiques, à l'exception d'un anneau de béton de 40 ml, construit localement en renforcement de la maçonnerie après un éboulement en 1976. Cet anneau est en saillie à l'intérieur du gabarit général.
- **ÉTANCHEITÉ** : aucune avant travaux



SURVEILLANCE

Ce tunnel n'a pas fait l'objet d'inspections systématiques. Depuis l'éboulement localisé de la voûte en 1976, le tunnel est suivi régulièrement par le maître d'ouvrage et par le CETU.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Le tunnel de Marquaires a été creusé entre 1868 et 1874 dans un rocher constitué de granite avec des passées argileuses, sur la plus grande partie du tunnel, et localement de schistes côté Florac.

Le tunnel, de 325 m, est situé sous un col entre le département de la Lozère et le département du Gard. Le tunnel comporte un ouvrage construit à l'air libre d'environ 80 m côté Florac destiné à protéger la tête des coulées de neige.

Un éboulement local de la maçonnerie s'est produit en 1976 dans la zone de jonction de cet ouvrage de tête et de la partie creusée du tunnel. Cette zone a été confortée sur 40 mètres avec des cintres lourds pris dans un revêtement en béton coulé contre la voûte maçonnée. Cet anneau en béton est en saillie à l'intérieur du gabarit du reste de l'ouvrage.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

État des lieux :

- maçonnerie ancienne déjointoyée avec des ventres et des arrivées d'eau formant, en hiver, du verglas en chaussée et des chandelles de glace en voûte ;
- quelques instabilités dans les structures maçonnées ;
- le réseau d'assainissement ancien est hors d'usage ;
- pas d'éclairage.



PROPOSITION DE SOLUTIONS

La solution préconisée :

La première solution envisagée consistait à renforcer les maçonneries par une couche de béton projeté armé d'un treillis soudé, à décaisser la chaussée pour reconstruire l'assainissement et à étancher l'ouvrage par un procédé innovant d'étanchement et de revêtement par coque indépendante en béton projeté.

Le procédé, envisagé alors, est décrit dans la fiche d'information CETU n°15 (mise en ligne sur le site du CETU). Il consiste à étancher l'ouvrage avec une étanchéité en mousse réticulée associée à une géomembrane PVC

reposant sur une ossature métallique fixée sur des fondations construites en base des piédroits. L'ossature métallique est ensuite recouverte par du béton projeté pour former le revêtement du tunnel. Cette solution a permis d'envisager la rénovation du tunnel en deux étapes sur deux années différentes : une première étape pour décaisser la chaussée, faire un nouvel assainissement et construire les fondations pour la coque de revêtement. Une seconde étape pour étancher la voûte et construire la coque de revêtement. Ce découpage en différentes tranches de travaux a permis la répartition des crédits de réparation sur deux années différentes.

ÉTUDE ET TRAVAUX DE LA PREMIÈRE ÉTAPE

L'étude de la première étape a été faite au CETU pour les parties techniques du DCE (CCTP et plans) et par la DDE de Lozère qui a lancé l'appel d'offres.

L'étude a été conduite sur la base de profils en travers lasers exécutés tous les 5 mètres pour vérifier le gabarit existant et déterminer une géométrie constante pour l'intrados du futur revêtement, qui doit englober toutes les déformations de la maçonnerie.

Date du marché : début 2000

Montant du marché : 823 124 € HT

Dates et durée des travaux : 15 avril au 15 novembre 2000 (chantier arrêté du 14 juillet au 15 août - période la plus touristique)

● EXÉCUTION DES TRAVAUX PREMIÈRE ÉTAPE EN 2000

Installation de chantier et contrôle de la sécurité de la voûte

L'entreprise réceptionne l'état du revêtement voûté en maçonnerie pour garantir la sécurité du chantier de terrassement. Les travaux de déblais en radier occasionnent en effet des vibrations auxquelles le revêtement existant doit résister. Le cas échéant, les confortations prévues peuvent être complétées sur proposition de l'entreprise. Il ne peut s'agir que de renforcement très ponctuel (rejointoiement local par exemple) car la mise en état de sécurité définitive de l'ancien revêtement sera réalisée dans la seconde tranche des travaux. L'état de la maçonnerie du tunnel de Marquaires ne présentait pas de risque immédiat d'éboulement.

Terrassement pour la construction des fondations de la coque et de l'assainissement

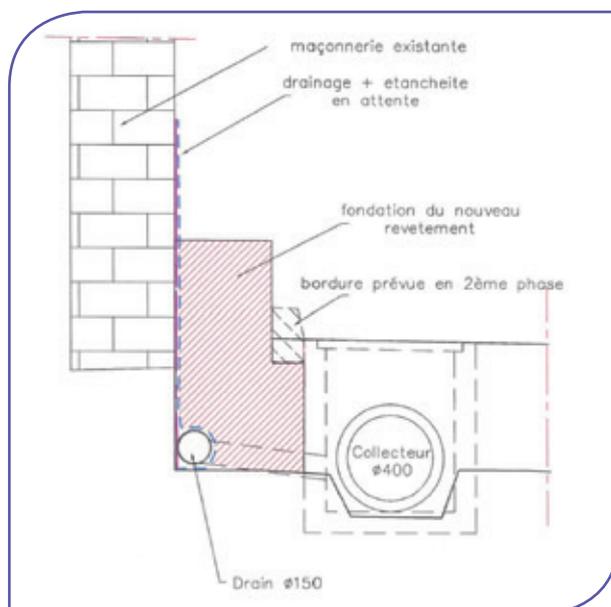
Le dégagement des fondations du revêtement existant a été réalisé avec prudence, en s'assurant que la qualité du rocher dégagé lui permettait de supporter le poids du revêtement. Dans le doute on aurait pu conforter à l'avancement le rocher dégagé sous la fondation. On peut aussi envisager de procéder au terrassement par plots de fouille alternés de longueur adaptée et construire la nouvelle fondation dans les premiers plots dégagés avant de terrasser les plots d'intervalle. Cette option conduit à des difficultés supplémentaires d'exécution de la nouvelle fondation (interruption des aciers, traitement des extrémités de plots).

Construction des fondations du futur revêtement et nouvel assainissement

Après le terrassement, le phasage des travaux est le suivant :

- réalisation d'un béton de propreté réglé suivant la pente du projet ;
- pose du drainage, de l'étanchéité en mousse réticulée à cellules fermées et de drains longitudinaux en base de piédroit. L'étanchéité reste en attente de son raccordement à l'étanchéité de voûte (prochaine tranche de travaux). La partie supérieure de l'étanchéité à raccorder est protégée provisoirement par une bande de contre-plaqué de 5 mm spitée sur la maçonnerie ;
- mise en place des armatures, coffrage et bétonnage des fondations ;
- pose et réalisation des collecteurs et regards. Coulage d'un béton de blocage jusqu'au niveau de l'arase supérieure des deux collecteurs Φ 400 ;
- remblaiement au-dessus des collecteurs et réalisation d'une chaussée provisoire pour rétablir le trafic.

Après cette première tranche de travaux, l'ouvrage a été remis en circulation dans l'attente des travaux d'étanchement et de revêtement de la voûte.



ÉTUDE ET TRAVAUX DE LA DEUXIÈME ÉTAPE

La réflexion s'est poursuivie après la première tranche de travaux. En accord avec le Département, il est constaté que les renforcements des maçonneries existantes restaient à réaliser et que l'épaisseur de ce renforcement par béton projeté, ajoutée à celles de l'étanchéité et de la coque en béton projeté indépendante du nouveau revêtement, serait globalement équivalente à celle d'un traitement traditionnel d'étanchéité par feuille PVC protégée par un revêtement en béton coffré de 30 cm. Localement, l'épaisseur du revêtement peut être réduite à 15-20 cm aux droits de ventres présents dans l'ancienne maçonnerie. En terme de renforcement, la solution traditionnelle en béton coffré présente l'intérêt de bloquer la maçonnerie en plaquant à l'ancienne structure. Comparativement, la solution initialement prévue avec un renforcement de béton projeté associé à une coque indépendante, ne bloque pas l'ancienne structure.

Il a été décidé de présenter le DCE de la deuxième étape de travaux, avec une solution de base traditionnelle en béton coffré, en laissant la possibilité aux entreprises de proposer des variantes techniques.

En 2002, après un premier appel d'offres resté infructueux, le maître d'ouvrage a pu disposer de crédits suffisants pour effectuer l'ensemble des travaux de chemisage du tunnel. L'entreprise Chantiers Modernes a été retenue à l'issue d'un second appel d'offres en répondant sur la solution technique de base par chemisage. Une autre entreprise a proposé une solution variante avec un renforcement de la maçonnerie puis une étanchéité protégée par une coque indépendante en béton projeté. Cette variante s'est révélée plus chère que celle de l'offre retenue. C'est un élément important qui tend à démontrer que le « procédé d'étanchement et de revêtement de tunnels par coque indépendante en béton projeté » (cf. fiche d'information CETU n°15) a trouvé au tunnel de Marquaires une limite technique et économique. En effet les qualités principales du procédé (suppression du coffrage, réduction des quantités de béton mis en œuvre) ne pouvaient pas s'exprimer dans cette réalisation, où le coffrage simple, d'un coût réduit, est amorti sur 325 m et où les volumes de béton du chemisage coffré sont limités par l'ancienne structure maçonnée.

● EXÉCUTION DES TRAVAUX DEUXIÈME ÉTAPE EN 2003

Date du marché : mars 2003

Montant du marché : 823 124,20 € HT
(étanchéité + chemisage en béton coffré)

Adjudicataire : Entreprise Chantiers Modernes Sud Est – étancheur : SLEG

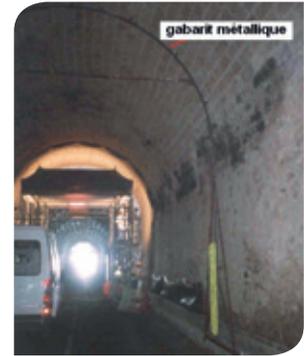
Dates et durée des travaux : du 1^{er} avril au 13 juillet et du 16 août au 15 novembre 2003

Installation de chantier, bouchage des trous dans la maçonnerie

Avant de poser les nappes drainantes de voûte et l'étanchéité, il est nécessaire de reboucher les trous dans la maçonnerie (moellons cassés, tombés) pour éviter le poinçonnement de l'étanchéité par la pression du béton lors du coulage.

Contrôle avec un gabarit métallique de l'épaisseur réelle du revêtement à réaliser

Des profils lasers avaient été effectués tous les 5 m ce qui ne permet pas la détection de en-profils éventuels entre deux profils. Le passage d'un gabarit métallique permet d'identifier tous les en-profils. Ponctuellement au droit de ventres de la maçonnerie, la plus faible épaisseur du revêtement en béton coffré s'est avérée être de 12 cm. La localisation et l'emprise des sous-épaisseurs du revêtement permettent d'anticiper les armatures à mettre en œuvre pour renforcer le revêtement dans ces zones. Une protection de la géomembrane d'étanchéité est à réaliser au niveau des zones armées.

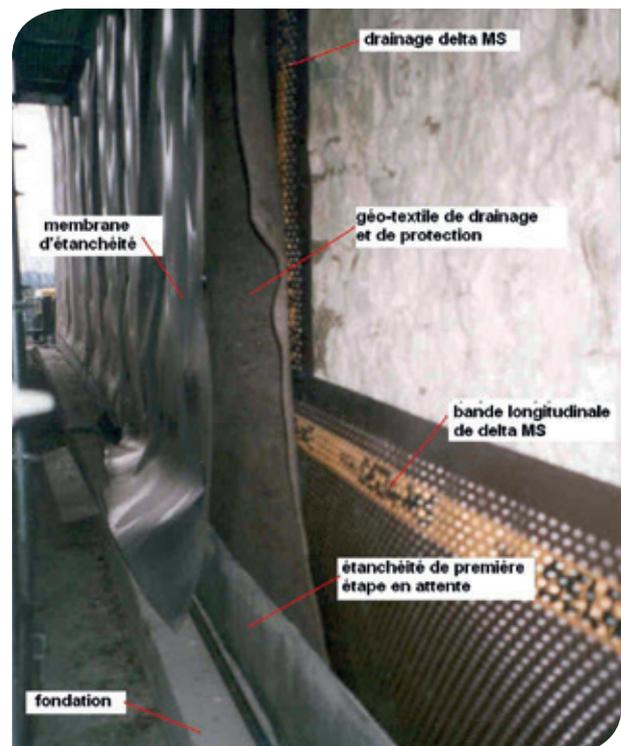


Préparation des fondations

Les fondations construites lors des travaux de la première étape sont à décaper, et notamment leur arase supérieure, pour une bonne adhérence du béton de chemisage coffré. Des armatures de type « poireaux », scellées à la résine, sont mises en places tous les 50 cm sur l'arase des fondations pour renforcer la liaison fondation / revêtement.

Mise en place des nappes de drainage

Pour maintenir un espace de drainage à l'arrière de l'étanchéité, les zones humides de la maçonnerie ont été systématiquement couvertes par un matériau drainant « gaufré » de type delta MS qui conduit les eaux d'infiltration jusqu'au niveau du drain de la fondation. Une bande de delta MS longitudinale d'un mètre de largeur est systématiquement placée au niveau de l'arase supérieure des fondations, pour favoriser le drainage de la zone au droit du raccordement des étanchéités de fondations et de voûte.



Mise en œuvre du complexe d'étanchéité de voûte

Le complexe d'étanchéité est constitué d'un géotextile de protection et de drainage, associé à une géomembrane d'étanchéité en Flagon 15/10^e mm. Ce matériau présente l'intérêt d'être directement thermosoudable sur la mousse réticulée en attente au-dessus des fondations. Le chantier de Marquairès a permis la validation de ce nouveau procédé d'étanchéité.

La liaison de la membrane Flagon à l'étanchéité de la fondation doit résister à la pression du béton lors du coulage. Elle est effectuée d'abord en soudant la membrane derrière la feuille de mousse (recouvrement type tuile) et ensuite en soudant à l'avant une bande longitudinale de Flagon sur la membrane d'une part et sur la mousse en attente d'autre part.



Soudure de la bande longitudinale en Flagon



Tunnel prêt à recevoir le chemisage en béton

Coffrage

Le coffrage métallique simple permet le passage d'une voie de circulation la nuit, en dehors de la période travaillée en journée. Il prend appui contre les fondations existantes. À noter que le point de remplissage situé en clé de voûte comporte un système à « guillotiné » qui est actionné lorsque le béton est mis en pression par la pompe lors du coulage. On évite ainsi le reflux du béton pour garantir un bon clavage.

À signaler également un système de joue gonflable pour coffrer l'extrémité de chaque plot.



Système « guillotiné » pour conserver la pression en clé de voûte



Joue gonflable en extrémité du coffrage

Bétonnage par anneaux

Pour permettre un décoffrage plus rapide, le béton initialement prévu en B25 a été remplacé par un B30 dont les caractéristiques de résistance sont atteintes plus rapidement. Le temps de prise du béton a varié selon la température extérieure saisonnière avec une amplitude forte entre les mois d'avril et de novembre. Le suivi de la prise du béton et de sa montée en résistance a été contrôlé par maturométrie. Le revêtement a été armé par un treillis soudé dans les zones de sous-épaisseur correspondant à des ventres de l'ancienne maçonnerie, tous situés dans la hauteur des piédroits.



BILAN DES TRAVAUX

Décompte définitif : 773 038 € HT soit une moins-value de 50 086 € par rapport au montant du marché. Cette réduction provient de l'écart entre les quantités du marché et les quantités réelles, soit 6 % du montant du marché. Le coût moyen au m² de l'étanchement et du chemisage du tunnel du Marquaires a été de 777 038 € / 4 300 m² = 180 € HT (valeur 2003, hors décaissement, chaussée, assainissement et fondations de la première étape de 2000 dont nous n'avons pas le montant).

Points particuliers d'exécution :

- un certain retard a été dû à l'allongement des temps de décoffrage pour ce chantier d'altitude (942 m), en raison de températures basses au courant des mois d'avril et d'octobre-novembre ;
- le passage du coffrage sous l'anneau existant, en saillie dans le gabarit, a été réalisé par un décaissement local de la chaussée ;

- le système gonflable pour les joues de coffrage est très bien adapté lorsque la géométrie de l'intrados existant est régulière (maçonnerie ou béton existant) ce n'est pas le cas pour des excavations rocheuses creusées à l'explosif ;
- le clavage de la clé de voûte, par mise en pression du béton dans cette zone puis maintien de la pression par le système « guillotine », s'est révélé efficace avec un bon remplissage en clé.

Durée des travaux : environ 2 x 7 mois sans compter les interruptions du mois d'août. Le coût des arrêts du chantier au mois d'août est difficilement identifiable car ils étaient prévus comme contrainte imposée dans les offres. De façon générale il faut bien intégrer les surcoûts engendrés par les contraintes du chantier, pour faciliter et maintenir un certain trafic routier pendant les travaux (par exemple de l'ordre de 5 % d'augmentation pour des travaux de nuit).

SUIVI DE L'OUVRAGE

Les travaux de modernisation du tunnel du Marquaires ont été achevés en 2006 par la rénovation de l'ancien anneau de soutènement revêtu avec cintres (voir encadré ci-dessous), qui n'avait pas pu être chemisé car il venait déjà en sur-épaisseur dans le gabarit routier.

La réparation de 2006 a consisté à étancher et à habiller les piédroits avec un complexe spécial. Des saignées drainantes ont par ailleurs été réalisées en voûte dans les joints humides entre anneaux de l'ancien revêtement en béton (voir la Fiche chantier 2 du tunnel du Marquaires, portant sur le drainage par saignées et l'habillage des piédroits).

En 2008, il restait à réaliser le balisage du tunnel par hublots de jalonnement. Le CG 48 devait soumettre à l'avis de la CNESOR (Commission Nationale d'évaluation de la Sécurité des Ouvrages Routiers) un dossier intégrant les différents travaux de modernisation réalisés.

Actuellement, le tunnel étanché et chemisé n'a plus aucune venue d'eau. Le nouveau béton de revêtement est de très bonne qualité et sans fissuration.

Les anciennes maçonneries, qui présentaient de fortes dégradations, sont totalement sécurisées et l'ouvrage asséché ne présente plus de difficulté d'exploitation pendant l'hiver.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

L'ouvrage rénové a perdu une partie de sa capacité (la largeur entre piédroits a été réduite d'environ 50 à 60 cm suivant les endroits). Après l'éboulement de la voûte en 1976, les travaux de réparation avaient localement déjà réduit le gabarit routier en soutenant la vieille voûte par des cintres pris dans un revêtement en béton coffré sur une quarantaine de mètres. Il n'existait pas de solution moins épaisse pour à la fois soutenir les maçonneries dégradées et étancher le tunnel.

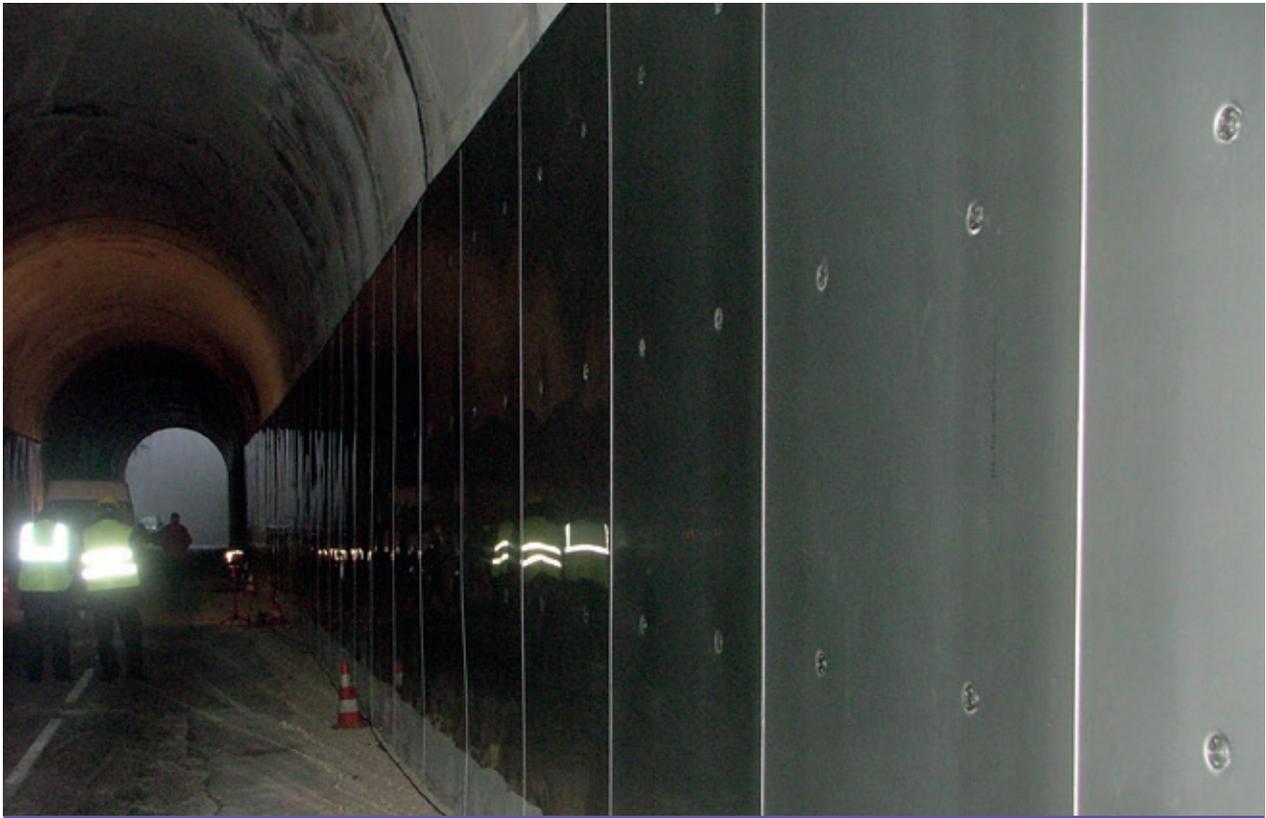
Le faible trafic dans le tunnel autorise la réduction du gabarit. Une exploitation de l'ouvrage en circulation alternée est toutefois envisagée.

Pour les ouvrages ayant un trafic plus fort (> à 200 véhicules/jour par exemple), il est généralement nécessaire de préserver le gabarit pré-existant au chemisage, ce qui conduit à effectuer soit un décaissement de la chaussée, soit un alésage avant reconstruction du revêtement.



TUNNEL DU MARQUAIRES (2)

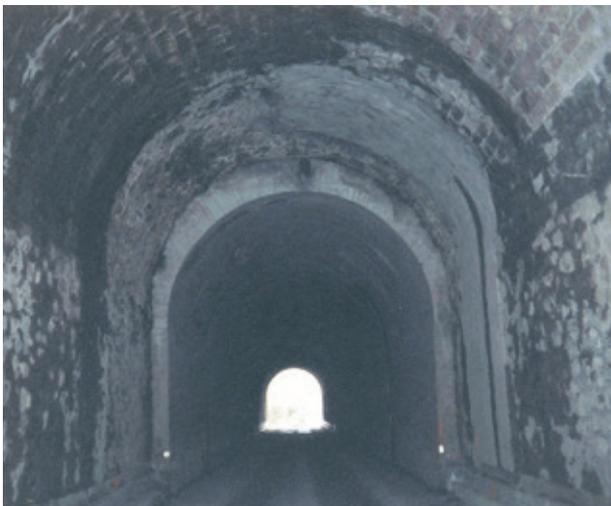
TRAVAUX EN 2006 : DRAINAGE PAR SAIGNÉES ÉQUIPÉES D'UNE DEMI-COUILLE EPDM
 DRAINAGE ET HABILLAGE MINCE DES PIÉDROITS



Vue de l'habillage mince des piédroits

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le texte de la présentation générale est à consulter sur la Fiche chantier 09 - Tunnel du Marquaires (1).



Vue de l'ancien anneau avant le chemisage de 2003



Vue de l'ancien anneau après le chemisage de 2003

SURVEILLANCE

Ce tunnel n'a pas fait l'objet d'inspections systématiques. Depuis l'éboulement localisé de la voûte en 1976, le tunnel est suivi régulièrement par le maître d'ouvrage et par le CETU.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Le tunnel de Marquaires a été creusé entre 1868 et 1874 dans un rocher constitué de granite avec des passées argileuses, sur la plus grande partie du tunnel, et localement de schistes côté Florac.

Le tunnel, de 325 m, est situé sous un col entre le département de la Lozère et le département du Gard. Le tunnel comporte un ouvrage construit à l'air libre d'environ 80 m côté Florac destiné à protéger la tête des coulées de neige.

Un éboulement des maçonneries s'est produit en 1976 dans la zone de jonction de l'ouvrage de tête et de la partie

creusée du tunnel. Cette zone a été confortée sur 40 mètres avec des cintres lourds pris dans un revêtement en béton qui vient contre la voûte maçonnée, en saillie à l'intérieur du gabarit du reste de l'ouvrage.

En 2003, des travaux d'étanchéité et de chemisage du tunnel ont été effectués (Fiche chantier 09 - Tunnel du Marquaires (1)). Mais, en raison de la position de l'anneau de confortation existant à l'intérieur du gabarit général, il n'a pas été possible de renforcer cette zone comme le reste du tunnel avec le chemisage en béton coffré mis en place en 2003.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

État des lieux :

- malgré le chemisage réalisé en 2003 dans les autres zones, le revêtement ancien reste encore en saillie en voûte ; il est à peu près dans l'alignement du nouveau revêtement dans l'emprise des piédroits ;
- le béton ancien est localement assez dégradé en base des piédroits et aux extrémités de l'anneau ;
- des infiltrations d'eau sont présentes notamment dans les joints de reprise de bétonnage entre anneaux du revêtement ancien.



Vue des dégradations en base de piédroits

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Les solutions envisagées :

- en voûte** : drainage des joints humides recensés (95 ml cumulés) par saignées drainantes isolantes ;
- en piédroits** : la solution envisagée, rabotage du revêtement sur une dizaine de cm pour permettre de loger une feuille d'étanchéité protégée ensuite par une structure en béton projeté armé de la même épaisseur, a été étudiée et estimée par l'entreprise Chantiers Modernes. Elle n'a pas été finalement retenue en raison de son coût et d'incertitudes au niveau de l'exécution liées à la présence de cintres

lourds dans le revêtement positionnés entre 5 et 10 cm du parement en béton coffré.

Le parti retenu :

- en voûte** : drainage des joints humides recensés (95 ml cumulés) par saignées drainantes isolantes ;
- en piédroits** : réalisation d'un programme exigentiel à joindre au DCE pour fixer les impératifs de la réparation en termes d'étanchéité, d'isolation thermique et d'épaisseur. Les offres d'entreprises sont jugées sur le coût et la qualité technique de leur proposition.

ÉTUDE ET TRAVAUX DE LA PREMIÈRE ÉTAPE

Le CG 48 a réalisé le DCE avec l'appui du CETU pour déterminer les réservations à faire pour la continuité du réseau des hublots de jalonnement, pour établir le programme exigentiel et pour établir le DCE équipement du réseau de jalonnement. Les travaux comprenaient 3 lots différents : le lot 1 qui regroupait le génie civil (tranchées extérieures pour l'alimentation électrique du réseau de jalonnement ; réparation de l'ancien revêtement par repiquage des zones dégradées et reconstruction en béton projeté ; exécution

des saignées drainantes) ; le lot 2 consacré à l'étanchement des piédroits, et le lot 3 pour la réalisation du réseau de jalonnement. Suivant la solution proposée, la même entreprise pouvait faire une offre pour les lots 1 et 2.

Au terme de la consultation le lot 1 a été attribué à l'entreprise Auglans. Le lot 2 a retenu la solution proposée par l'entreprise Pyramid pour l'étanchement et l'habillage des piédroits. Le lot 3 n'a finalement pas été attribué et repoussé à l'étape ultérieure.

Montant du marché :

Lot 1 : notifié le 19/07/2006 pour 48 129 € HT

Lot 2 : notifié le 19/07/2006 pour 72 994 € HT

Dates et durée des travaux pour les 2 lots :

septembre – mi-novembre 2006

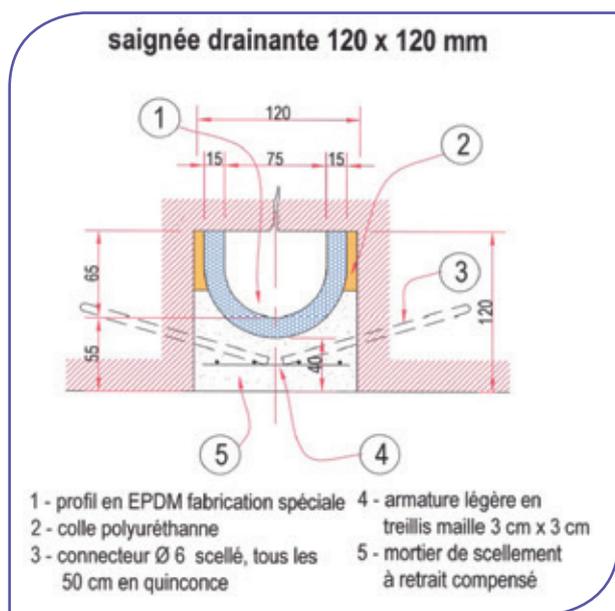
**EXÉCUTION DES TRAVAUX
LOT 1 (ENTREPRISE AUGLANS)**

Les travaux de terrassement extérieurs et de réfection de l'ancien revêtement sont traditionnels avant la mise en œuvre de l'habillage étanche des piédroits. Leur description ne présente pas un intérêt particulier, leur exécution n'appelle pas de commentaire.

L'exécution des saignées drainantes a permis de mettre au point une nouvelle variante de saignée pouvant résister au gel.

Le marché décrivait un type de saignée isolante comportant un profilé en polystyrène dur de fabrication spéciale, qui aurait pu manquer de souplesse pour le cintrage nécessaire au suivi de la voûte.

L'entreprise a proposé de remplacer le profilé du marché par une demi-coquille en EPDM (Etylène Propylène, Diène Monomère), plus simplement un caoutchouc synthétique fabriquée sur commande.



Les fissures à traiter ont été identifiées en période humide pendant le chantier de « chemisage » des maçonneries en 2003. Les joints humides concernent l'ensemble du développé de la voûte ou simplement une partie. Les saignées ou parties de saignées réalisées en voûte ont été interrompues à un mètre sous le niveau des piédroits habillés. Les eaux drainées sont ensuite évacuées par le système de drainage et d'habillage des piédroits.

Les travaux ont été réalisés au mois de septembre. La période n'était pas favorable par rapport aux arrivées d'eau. Le collage des coquilles a cependant été possible en séchant localement l'humidité des saignées à l'aide d'une lampe à souder.

Phasage d'exécution des saignées :

- réalisation de sciages parallèles en bords de saignée ;
- démolition du béton dans l'emprise de la saignée ;
- réalisation des forages d'appel : diamètre 50 mm ; longueur 1 m ; espacement 1,5 m, réalisation avec une carotteuse électrique ;
- lavage à l'eau sous HP des forages et de la saignée ;
- perçage des trous de scellement des connecteurs de diamètre 6 mm ; tous les 50 cm en quinconce ;
- dépoussiérage à l'air comprimé ;
- mise en place de la ½ coquille EPDM en la maintenant avec les connecteurs qui ne sont pas encore scellés ;
- collage de la ½ coquille en fond de saignée avec une colle époxydique thixotrope à 2 composants (ici « Sikadur – 30 Colle »). La colle assure la fixation du profilé et son étanchéité avec les bords de la saignée ;
- scellement des connecteurs à la résine époxy sans styrène (ici « Hilti – cartouche HIT-RE 500) ;
- fixation d'un treillis fin sur les connecteurs. Ses mailles ne doivent pas gêner le passage de la projection de l'enduit à retrait compensé ;
- point d'arrêt pour un contrôle d'exécution (étanchéité + mise en place des différents éléments) avant le rebouchage de la saignée ;
- rebouchage de la saignée avec un mortier à retrait compensé projeté en 1 ou 2 passes. La dernière passe est talochée. Le mortier à retrait compensé a été du « Madarep » de la marque Weber et Broutin.



EXÉCUTION DES TRAVAUX LOT 2

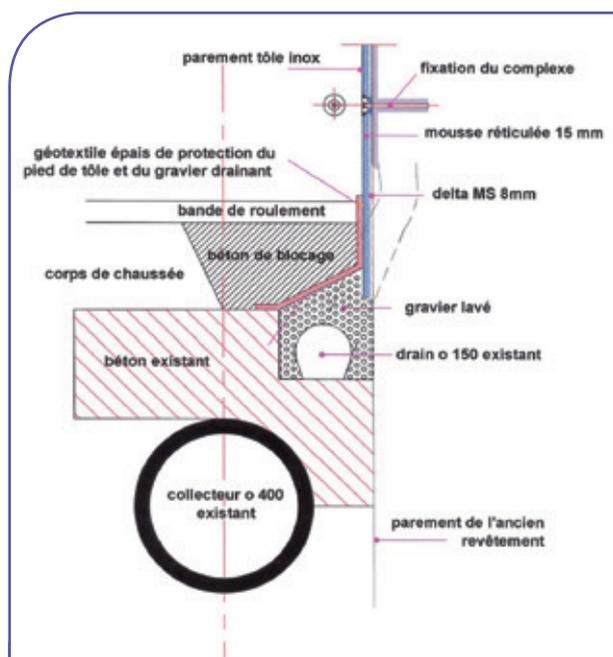
La solution retenue pour réaliser de drainage et l'habillage mince des piédroits est un procédé breveté qui comporte les éléments suivants (du parement du vieux béton jusqu'au nouveau parement) :

- drainage de l'ancien béton par feuilles « gauffrées » de type delta MS fixées sur toute la surface à traiter ;
- isolation assurée par une épaisseur de mousse réticulée collée sur le delta MS ;
- habillage par un nouveau parement en tôle inox fixé sur le revêtement existant par un dispositif qui rétablit l'étanchéité au droit des fixations.

L'épaisseur de l'ensemble du complexe est de 25 mm. L'étanchéité est assurée par les trois produits (delta MS, mousse réticulée, tôle inox). L'isolation thermique est assurée par la mousse.

Réception du support et dégagement des bases de piédroits

La réparation des piédroits exécutée dans le lot n°1 est réceptionnée en contrôlant que le bosselage du parement est conforme aux prescriptions du marché (+ ou - 1 cm). L'assainissement du tunnel a été refait en 2000 (cf. Fiche chantier 09 - Tunnel du Marquaires (1)). Dans la traversée de l'ancien anneau, le nouvel assainissement comporte en base de chaque piédroit un collecteur Φ 400 protégé par un massif en béton avec une réservation en escalier (cf. figure ci-dessous) pour loger un drain longitudinal prévu pour collecter les eaux d'infiltration en provenance des saignées ou de l'étanchéité à venir des piédroits. Les bases de piédroits sont donc dégagées délicatement jusqu'au drain longitudinal afin de pouvoir descendre jusqu'à ce niveau les éléments constitutifs du nouveau parement étanche.



Détail de la base du complexe étanche

Fixation du delta MS sur les piédroits

Le delta MS de 8 mm d'épaisseur est livré en rouleaux de 2 m de largeur. Il est déroulé longitudinalement sur le revêtement et fixé par « spitage ». La bande haute est placée la première puis celle du bas est ajustée avec un recouvrement en tuile. À la jonction la feuille haute passe sous la feuille basse.



Pose de la bande haute de delta MS

Mise en place des lès de mousse pour l'isolation thermique

Les lès sont en mousse de polyéthylène réticulé (cellules fermées pour un produit étanche) référencée ALVEOLIT TA FRO 3500 de masse volumique de 29 kg/m³. Classement au feu : M1. Elle est livrée sur le chantier en rouleaux de 20 m. Elle comporte une face encollée protégée par un film. Les rouleaux sont découpés sur le site en lès de la hauteur des piédroits et collés sur le delta MS. Les lès sont raccordés entre eux par une bande de ruban adhésif.



Lès de mousse collés sur le delta MS

Mise en œuvre du parement en tôle inox

Le parement du complexe est réalisé avec des plaques de tôle inox mat de 1 mm d'épaisseur, spécialement fabriquées avec des emboutis coniques pour loger les fixations et un pliage « femelle » sur un côté pour recevoir le côté sans pliage de la plaque contiguë.



Parement en tôle inox mat

Les plaques sont fixées par chevillage au droit des emboutis coniques. Lorsque une nouvelle tôle est en place le perçage de fixation s'effectue, au travers de la mousse et du delta MS, sur une dizaine de centimètres dans l'ancien béton. On met alors en place une cheville à béton et une tige filetée sur laquelle est ensuite vissé un boulon spécial conique qui épouse la forme de l'emboutis. L'étanchéité est rétablie au droit de chaque fixation par une rondelle en caoutchouc serrée avec le boulon conique.

Points particuliers :

- réservations pour loger les hublots de jalonnement : le passage du réseau électrique d'alimentation des hublots de jalonnement est préparé à l'arrière du nouveau parement. Il sera logé dans des fourreaux encastrés dans des saignées pratiquées dans l'ancien béton de revêtement (lot 1). Les fourreaux aboutissent tous les 10 m environ dans des réservations où seront logés les hublots. Le nouveau parement doit être découpé au droit des réservations.

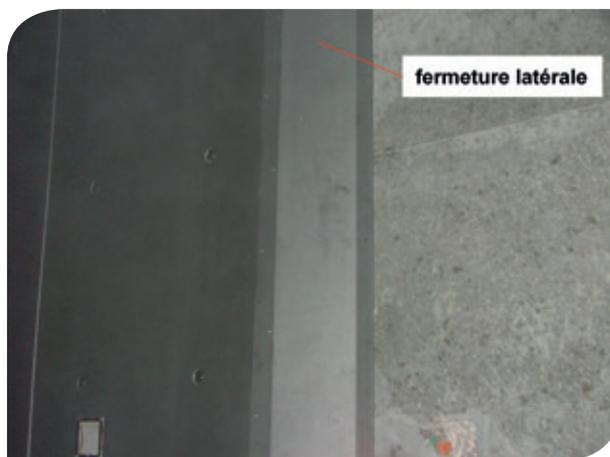


Réservation au droit d'un hublot

- fermetures du complexe étanche : le complexe est fermé par des profilés inox spéciaux à chaque extrémité, longitudinalement et latéralement, notamment pour éviter le passage du froid.



fermeture longitudinale



fermeture latérale

Renvoi des eaux drainées vers le collecteur (cf. schéma de la page précédente)

Les eaux collectées par les saignées drainantes et au niveau de l'ancien revêtement descendent à la base du delta MS. Elles tombent sur un matériau drainant et migrent vers le drain longitudinal qui les conduit dans le regard construit sur le collecteur Φ 400 à l'extrémité de l'ancien anneau, côté Florac.

Enchaînement des travaux :

- pose du drain longitudinal ;
- mise en place du gravier 10/30 ;
- mise en place du géotextile de protection du gravier. Il est fixé de manière à ne pas laisser de possibilité d'infiltration de laitance du béton à mettre ensuite en œuvre. Ici le géotextile est fixé par une bande métallique spitée sur l'arase supérieure de la réservation en escalier du massif béton du collecteur Φ 400 ;
- mise en œuvre du béton de blocage peu « mouillé » au-dessus du géotextile. Le niveau de l'arase supérieure du béton doit permettre de placer la bande de roulement de la chaussée qui sera mise en œuvre à la fin des travaux.

BILAN DES TRAVAUX

Décompte définitif :

Lot 1 : 45 425,71 € HT

Lot 2 : 76 594,00 € HT

On observe une moins-value de 2 704 € sur le marché du lot 1 et une plus-value de 3 600 € sur le lot 2.

Coût du complexe drainant : 76 594 € / 294 m² = 260 € HT le m² (valeur 2006, y compris dispositif de collecte des eaux en base de piédroits).

Coût des saignées drainantes : le coût pour le tunnel de Marquaires n'est pas significatif car l'entreprise a manifestement sous estimé ce poste dans son offre (prix payé = 54 €/ml ; prix estimé = 150 €/ml).

Points particuliers d'exécution :

Les travaux d'étanchéité par saignées drainantes sont à réaliser si possible en période sèche.

L'entreprise a pu pallier la présence d'humidité dans les saignées en les séchant à la lampe à souder avant de coller les coquilles EPDM. La pose du complexe de drainage s'est réalisée sans problème particulier.

Durée des travaux :

Lot 1 : septembre à mi-octobre

Lot 2 : mi-octobre à mi-novembre la circulation routière étant rétablie chaque soir pour la nuit.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Après deux hivers (2007 et 2008), l'ancien anneau est totalement sec tant au niveau des saignées qu'au niveau de l'habillage des piédroits. Il n'y a pas de trace de dégradation qui serait due au gel (pas de bosselage du parement, pas d'éclatement du mortier

au niveau des saignées). On peut observer des traces de circulation d'eau sur le parement inox, que l'on a pu identifier comme provenant de la condensation du brouillard très souvent présent dans le tunnel en automne et en hiver.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Ce type de saignée équipées de ½ coquilles EPDM, mis au point au tunnel du Marquaires, a été une avancée par rapport aux saignées équipées de profilé PRT, longtemps utilisées mais qui présentent souvent des défauts d'étanchéité. En effet, les saignées « Marquaires » sont totalement étanches (sous réserve d'une mise en œuvre correcte notamment lors du collage des coquilles) et ne présentent pas de sur-épaisseur par rapport au revêtement existant. Elles ne donnent donc pas de prise aux risques de chocs.

Il serait judicieux d'effectuer une analyse des eaux pour évaluer le risque de colmatage à terme des profilés EPDM des saignées.

La mise en œuvre des ces saignées reste délicate, surtout en présence de venues d'eau dans les saignées. Il est actuellement, recommandé de privilégier la technique mise en œuvre au tunnel du col de Menée. L'important est surtout de réaliser un retour technique étanche couvrant très largement la saignée. La largeur de ce retour est de l'ordre de 1 m. Il doit permettre de couvrir les zones de béton poreux, courantes en about de coffrage.

L'habillage drainant mis en place localement en piédroits est étanche et isotherme. Il donne satisfaction par ses qualités d'étanchement et de drainage et par ses qualités esthétiques d'habillage du vieux béton. L'épaisseur de la tôle inox était de 10/10^e de mm. Elle gagnerait à être portée à 12/10^e pour présenter plus de « raideur », afin de mieux absorber les défauts du parement existant.

Il faut noter que ce type de « carrossage » cache la structure de l'ouvrage. Il doit être mis en œuvre sur une structure solide (ici cintres lourds et béton coffré).

RD 926 – GRAND TUNNEL

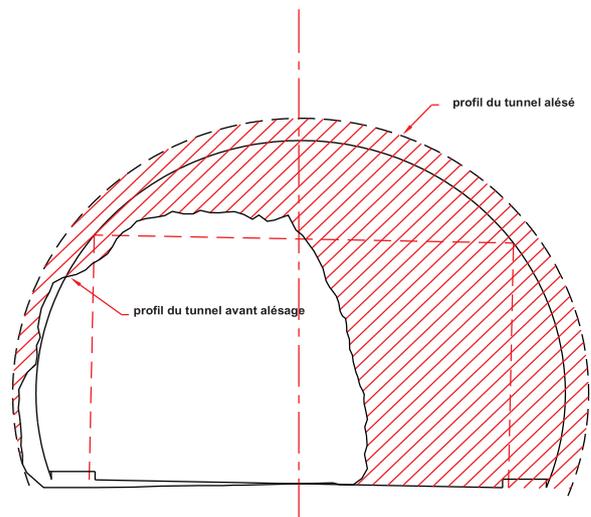
TRAVAUX EN 2006 : RECTIFICATION IMPORTANTE DE GABARIT PAR ALÉSAGE À L'EXPLOSIF



Alésage à la tête aval

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE AVANT TRAVAUX

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1894
- **LOCALISATION** : RD 926 de St-Jean-de-Maurienne à St-Jean-d'Arves, Savoie (73)
- **ALTITUDE** : 1 288 m
- **LONGUEUR** : 499 m
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit orienté Nord 175° Est
- **PROFIL EN LONG** : déclivité de 1,3 % vers St-Jean-d'Arves
 Profil en travers :
 - largeur entre piédroits : 5,10 m (tête amont)
 - hauteur en clé : 5,20 m
 - largeur roulable : 5 m de chaussée pour une hauteur de 3,20 m et 2,50 m pour une hauteur de 4,80 m
 - pas de trottoirs
 - gabarit autorisé : 3,60 m
- **REVÊTEMENT** : tunnel non revêtu sauf :
 - PM 0 à 16,5 et 464 à 480 : maçonnerie de moellons de tufs calcaire hourdés au mortier de chaux
 - PM 16,5 à 61 et 320 à 380 : béton projeté sur treillis soudé
- **ÉTANCHÉITÉ** : aucune avant travaux
- **COUVERTURE** : 180 m maximum vers le PM 175 ; partie construite à l'air libre entre les PM 468 et 478
- **ÉCLAIRAGE** : lampes anciennes au Sodium Basse Pression fixées en clé de voûte



SURVEILLANCE

Ce tunnel a fait l'objet de deux inspections détaillées du CETU, l'une en 1976 et la seconde en 1993.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Le tunnel est entièrement creusé en travers-bancs dans des calcaires noirs, plus ou moins marneux, du Lias (Hettangien-Pliensbachien). Bien que la schistosité soit peu apparente au niveau du tunnel, cette formation est souvent désignée sous le terme de schistes.

Le terrain présente une stratification marquée aux têtes ainsi qu'au centre du tunnel. La stratification en tête amont se caractérise par une alternance de bancs calcaires durs et marneux tendres. Deux systèmes de diaclases importants et un troisième plus discret sont aussi présents. De nombreuses fissures et hors profils résultent d'anciennes contraintes tectoniques dans ce secteur, qui entraînent une décohérence progressive de la roche avec des fissures présentant des parties broyées. De l'argile est également présente dans les fissures.

L'aménagement touristique du massif des Sybelles situé au-dessus de St-Jean-de-Maurienne comporte six stations de ski (St-Jean-d'Arves, St-Sorlin, le Corbier, la Toussuire et la vallée des Villards). Grâce aux liaisons des domaines skiables créées entre ces stations en 2003, le domaine des Sybelles constituent le 4^e domaine skiable français.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

État des lieux :

- le Grand Tunnel est non revêtu sur la plus grande partie de sa longueur, à l'exception de deux zones en maçonnerie de 15 ml vers les entrées et de 60 ml qui ont été confortées par un soutènement en béton projeté ;
- le tunnel existant avait une section moyenne de 26 m² et était globalement peu humide.

La desserte de St-Jean-d'Arves et de la vallée de l'Arvan s'effectue par la RD 926 qui comprend un tronçon de 1 600 m avec quatre anciens tunnels, dont le gabarit étroit ne permettait pas le croisement des poids lourds et des cars. La sécurité des usagers était mal assurée notamment dans le « Grand Tunnel » de 499 m. La nécessité d'améliorer la capacité de l'itinéraire et sa mise en sécurité réglementaire ont déterminé le CG 73 à programmer une rectification très importante du tronçon de 1600 m. Le CETU a effectué une première étude pour fixer, avec le CG 73, les limites de la rectification souhaitée en fonction des ouvrages existants. Sur la base de cette étude un Maître d'œuvre a été choisi pour la suite des études et le contrôle des travaux. Ceux-ci ont été réalisés sur 4 années :

- en 2004 : suppression du « Petit Tunnel » (38 m) par création d'une tranchée ouverte ;
- en 2005 : rectification du « Grand Tunnel » (499 m) ;
- en 2006 : rectification du tunnel de Combe-Soudan (184 m) et reconstruction du paravalanche de la tête aval ;
- en 2007 : rectification du tunnel d'Arcellaz (111 m) et reconstruction du paravalanche de la tête aval.

Le CETU a eu une mission d'assistance à MOA pour le contrôle des études et le choix des entreprises.



Vue de l'intérieur du tunnel en section courante

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Les solutions envisagées :

- la première solution envisagée en 2000 par la DDE 73 consistait à élargir localement le Grand Tunnel pour créer des zones de croisement pour les poids lourds. La catastrophe du Mont-Blanc et la nouvelle réglementation sur la sécurité dans les tunnels routiers ont conduit à préférer une solution plus ambitieuse ;
- la seconde solution comprend un alésage important de la section du tunnel, afin de loger un profil en travers comportant deux voies de 3,50 m et deux trottoirs de 0,75 m avec une hauteur libre

minimale de 4,30 m sur la largeur roulable, conformément aux recommandations de l'ARP (document d'État sur l'aménagement des routes principales).

Le parti retenu :

La seconde solution a été retenue. L'alésage nécessaire pour recalibrer le tunnel existant devait prendre en compte les épaisseurs des soutènements ainsi que la possibilité de pouvoir loger un revêtement en béton coffré sur toute la longueur du tunnel. Globalement, l'alésage prévu conduit à doubler la section du tunnel existant.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

Le maître d'œuvre sélectionné après l'appel d'offres au printemps 2004 a été la SNCF – Direction de l'Ingénierie. Les études phases AVP, PRO (Projet) et phase DCE ont été conduites sur l'ensemble des quatre tunnels.

Compte tenu de la proximité des tunnels entre eux et pour des raisons évidentes de sécurité, leur modernisation a été appréhendée sous l'angle d'une continuité de traitement du tronçon routier de 1600 m. Les principes de sécurité qui ont conduit à la caractérisation géométrique de la rectification du Grand Tunnel ont été repris pour les autres ouvrages.

Les études ont montré l'intérêt de supprimer le Petit Tunnel par une tranchée compte tenu de la faible importance de sa couverture. Le coût des terrassements en tranchée s'est révélé inférieur à celui de l'élargissement du Petit

Tunnel existant. Le CG 73 a donc choisi de commencer rapidement la rectification de la RD 926 par le terrassement d'une tranchée au droit du Petit Tunnel dès l'été 2004 (entreprise Martoïa de St-Jean-de-Maurienne).

Les tunnels Grand Tunnel, Combe Soudan et Arcellaz ont fait l'objet d'un même DCE comportant le Grand Tunnel en tranche ferme pour l'année 2005 et les deux autres tunnels en tranches conditionnelles affermissables respectivement en 2006 et 2007.

La présente fiche de cas ne traite que des études et des travaux du Grand Tunnel. Pour un résumé de l'ensemble des travaux, on peut se reporter à l'article « Aménagement de la RD 926 en Savoie au droit des tunnels de la vallée de l'Arvan » dans la revue *Tunnels et ouvrages souterrains* de l'AFTES n°208 de juillet-août 2008.



« Petit Tunnel » avant



« Petit Tunnel » après

MARCHÉ ET TRAVAUX

● EXÉCUTION DES TRAVAUX DU GRAND TUNNEL

Date du marché : mars 2005

Montant du marché : 3 580 267 € HT

Dates et durée des travaux : entre mai et décembre 2005

Adjudicataire génie civil : Campenon Bernard

Réalisation des têtes de tunnels



Tête amont avant travaux



Dégagement de la tête construite à l'air libre et mise en place d'une voûte parapluie en tubes pétroliers



Alésage de l'entrée amont et soutènement par cintres



Étanchement et ouvrage de tête amont en béton coffré

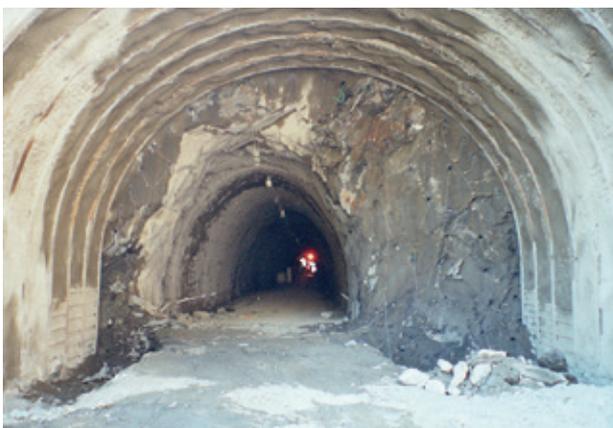


Tête aval avant travaux



Tête aval après travaux

Travaux d'alésage en tunnel



Emprise de l'alésage vue depuis l'aval

La section du tunnel a été portée de 25 m² à 52 m² par alésage à l'explosif de l'excavation rocheuse existante.

Le CETU a réalisé un suivi spécifique de recherche sur quelques volées, pour identifier les rendements liés au plan de tir et les vibrations associées à des tirs d'alésage en grande masse.

Le rocher excavé s'est révélé conforme à la géologie de l'ancien tunnel. En dehors des zones de têtes, il s'agissait d'un rocher en moyenne relativement compact.



« Jumbo » deux bras

Moyens pour le poste du déroctage d'alésage

Personnels : 1 chef de poste ; 1 mineur foreur ; 1 aide-mineur, 1 conducteur d'engins

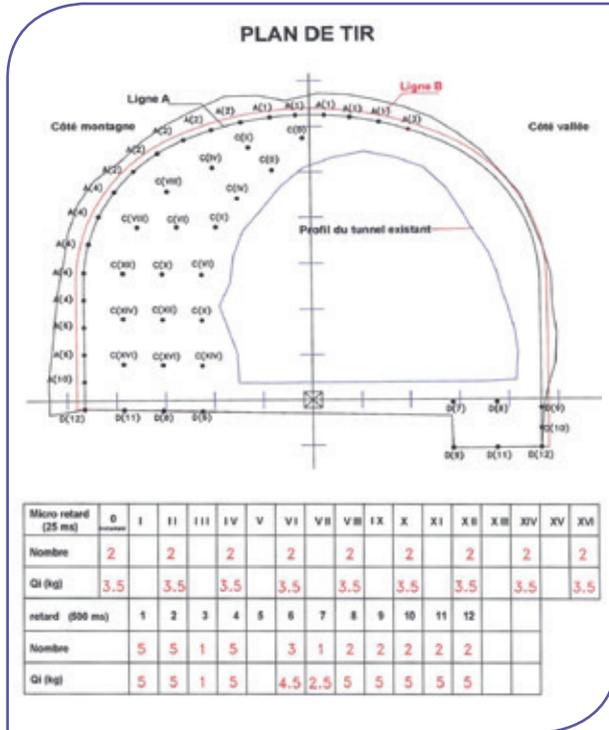
Matériels : 1 Jumbo 2 bras ; 1 pelle à chenilles Liebherr R932 ; 1 chargeur Wagner ST-6 godets 6 m³

Explosif et détonateurs : émulsion « emulsat 3000 et 5000 » ; détonateurs électriques haute intensité Nitro-Bickford

Cycles d'exécution

Le cycle de creusement est identique à celui d'un tunnel neuf :

- implantation des trous de forages de la volée ;
- foration des trous de mines ;
- chargement des « cannes » contenant l'explosif (amorçage fond de trou obligatoire) ;
- tir et aérage ;
- purge de sécurité ;
- déblaiement et purge.



La durée d'un cycle moyen est d'environ 7 heures soit un poste de travail, une moyenne de deux tirs en 24 heures sur 3 postes en intercalant les temps de mise en œuvre du soutènement.

L'excavation est systématiquement terminée au brise-roche pendant l'opération de purge.

Observations sur le rendement : l'excavation d'alésage du Grand Tunnel confirme l'intérêt d'une solution de rectification et d'aménagement d'un ouvrage existant par rapport au creusement d'un nouveau tunnel parallèle. Connaître précisément la géologie qui sera recoupée permet d'anticiper les moyens, les avancements et les soutènements. Les explosifs ont un meilleur rendement car le dégagement du déblai s'effectue principalement par le côté, contrairement au creusement d'un tunnel neuf en pleine section où le dégagement s'effectue seulement par l'avant. L'aérage après le tir est plus rapide grâce au courant d'air existant. Les déblais d'alésage peuvent être évacués soit d'un côté soit de l'autre, ce qui donne de la souplesse pour la gestion du chantier.

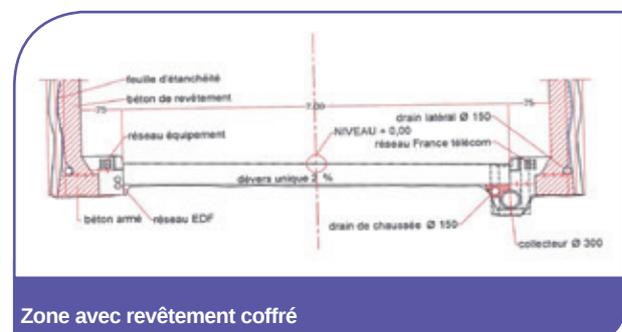
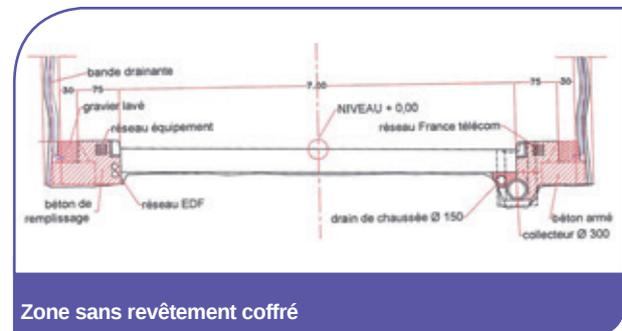
Soutènement en tunnel

La géologie de la nouvelle excavation était connue par l'ancien tunnel. Elle a été globalement conforme à ce qui était attendu. Un incident a eu lieu quelques mètres après

la tête aval dû à un talweg qui a entraîné une insuffisance de couverture sur deux mètres en rein côté vallée (traitement en avenant, voir « bilan des travaux »). En dehors des zones de têtes comportant cintres, blindage et voûte parapluie à l'amont, le soutènement du tunnel en section courante a été réalisé par boulons d'ancrage et béton projeté en densité et en épaisseurs adaptées.

Étanchéité, revêtement et assainissement

À l'époque des différentes études d'aménagement, l'ancien tunnel était assez peu humide. Pour limiter les investissements immédiats, il a été prévu d'étancher par feuille PVC seulement les entrées en tunnel (20 m amont ; 30 m aval) et de réaliser un revêtement en béton coffré dans ces zones. En section courante le tunnel n'est pas étanché, un système de drainage, décrit ci-après, a été mis en œuvre dans les sections humides. L'emprise de l'excavation nouvelle permettra toutefois de loger un revêtement en béton coffré et une étanchéité par feuille sur toute la longueur du tunnel. Les dispositions constructives ont été les suivantes :



Le drainage des zones humides en section courante est constitué par des auréoles de drainage prises dans l'épaisseur du béton projeté de soutènement et complétées par un enduit étanche réalisé en voûte sur le parement du soutènement en béton projeté. Les auréoles de drainage sont implantées longitudinalement tous les 2,50 m.

Des forages d'appel sont réalisés tous les 2 m sur le développé des auréoles. Les eaux drainées sont collectées par une bande transversale de delta MS de 40 cm fixée sur la première couche de béton projeté, puis renvoyées dans un caniveau en base de piédroit.

Les eaux du massif drainées dans le tunnel sont conduites soit par des drains longitudinaux (zones étanchées) soit par les caniveaux de base de piédroit (zones drainées) vers un collecteur général, dans lequel elles sont renvoyées au droit des regards qui récupèrent également les eaux de chaussée.

BILAN DES TRAVAUX

Montant du marché génie civil : 3 580 267 € HT
Avenant pour aléas géologiques : 421 947 € HT
Coût du génie civil tunnel : 4 002 214 € HT
 soit une plus-value de 15 % du montant du marché

Des aléas géotechniques et hydro-géologiques rencontrés pour le Grand Tunnel ont nécessité :

- l'étude et le confortement complémentaires du talus à la tête amont (à l'extérieur) ;
- des sondages complémentaires sous chaussée entre le Grand Tunnel et le tunnel de Combe Soudan (à l'extérieur) ;
- la réparation d'un incident à la tête aval au droit d'une zone de talweg mal reconnue, qui a entraîné une insuffisance de couverture en tunnel sur deux mètres en ½ voûte côté vallée (traitement par bétonnage extérieur sur les cintres lourds avec blindage en continuité du soutènement de tête) ;
- l'extension de zones qui ont été étanchées et drainées pour conduire les eaux d'infiltration dans les caniveaux.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Les travaux ont été achevés en décembre 2005 sans que l'enduit prévu sur les voûtes en zones humides n'ait été réalisé, ceci afin de localiser précisément les arrivées d'eau pendant l'hiver. Durant les saisons hivernales 2005-2006 et 2006-2007, la zone humide juste après la zone étanchée de la tête amont et traitée en drainage sans enduit a été le siège de nombreuses arrivées d'eau qui ont créé du verglas et des stalactites de glace très gênants pour l'exploitation. Outre l'absence d'enduit étanche, il s'est avéré que les bandes des auréoles drainantes perdaient l'eau par les côtés avant qu'elle soit évacuée dans les caniveaux. Devant l'importance des

arrivées d'eau, cette zone a été traitée en 2007 avec une étanchéité intégrale par feuille PVC et une coque en béton projeté armée par cintres réticulés et treillis soudé en remplacement de l'enduit étanche initialement prévu. Ici la coque de revêtement colle à la membrane d'étanchéité (pas d'espace entre la coque et le terrain). Elle a été réalisée dans l'emprise de la sur-excavation réservée pour loger le cas échéant un revêtement en béton coffré (voir paragraphe étanchéité, revêtement assainissement). Il faut noter l'importance d'avoir prévu cette possibilité dans le projet. D'autres zones humides du Grand Tunnel ont été traitées avec un enduit étanche en 2007.

ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

L'expérience du Grand Tunnel montre que l'alésage d'un tunnel existant accentue les arrivées d'eau au-delà de la simple proportionnalité liée à l'augmentation de la section de l'ouvrage. Le tunnel ancien existant qui était relativement sec s'est révélé humide après l'alésage. Pour faciliter l'exploitation de ce tunnel de montagne, soumis à une longue période de gel, il eut été préférable d'augmenter la longueur des zones de têtes étanchées intégralement et revêtues en béton coffré (au moins 50 jusqu'à 100 m à chaque tête). En effet, les zones d'entrées sont généralement les plus humides en raison de la faible épaisseur de la couverture qui favorise les infiltrations des eaux liées aux intempéries.

Dans les zones drainées, les fuites des bandes des auréoles de drainage sont causées d'une part par le bosselage du support rocheux qui, en formant transversalement des pentes anarchiques, renvoie localement les eaux sur les bordures et d'autre part par un défaut d'étanchéité des rubans de mousse à cellules ouvertes collés sur les bordures de bandes de delta PT. Après l'alésage à l'explosif, il conviendrait d'une part de reprendre au brise-roche l'excavation dans l'emprise des auréoles de drainage pour régulariser le support rocheux et d'autre part d'utiliser des rubans de mousse étanche (mousse à cellules fermées) pour arrêter les eaux en bordures des bandes de delta PT.

TUNNEL DU COL DE MENÉE

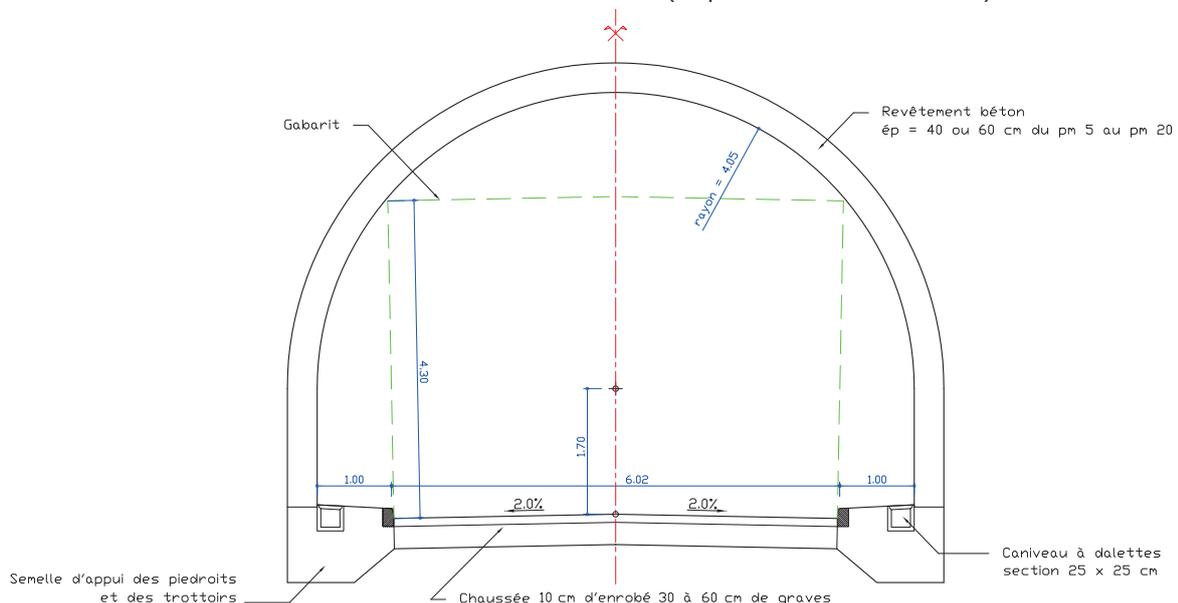
TRAVAUX EN 2013 : ÉTANCHEMENT DES PIÉDROITS, DRAINAGE DES JOINTS TRANSVERSAUX ET INJECTION DE CLAVAGE EN VOÛTE



Tête côté Drôme / Tête côté Isère

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : XIX^e siècle
- **LOCALISATION** : RD 120, Drôme (26)
- **ALTITUDE** : 1 457 m
- **CLIMAT** : montagne
- **LONGUEUR** : 256 m (+ 2 x 5 m de têtes)
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** : ouvrage bidirectionnel
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN LONG** : pente de 0,72 % vers la Drôme
 - Profil en travers :
 - largeur chaussée : 6 m
 - largeur entre piédroits : 8 m
 - voûte plein cintre de rayon : 4 m
 - piédroits verticaux de 1,60 m
 - dévers 2 % en toit
 - hauteur libre mini : 4,30 m
- **REVÊTEMENT** : béton coffré épaisseur 0,40 m
- **ÉTANCHEITÉ** : sans
- **VENTILATION** : naturelle
- **ASSAINISSEMENT** : longitudinal avec caniveau à dallettes
- **CHAUSSÉE** : épaisseur 0,30 m
- **ÉCLAIRAGE** : sans
- **MASSIF ENCAISSANT** : rocheux fortement fracturé
- **COUVERTURE** : faible 55 m
Talweg au dessus et parallèle au tunnel
- **HYDROLOGIE** : forte activité des venues d'eau (en particulier à la tête Drôme)



SURVEILLANCE

Une inspection détaillée initiale a été réalisée par le CETU en 1994. Le tunnel a également fait l'objet d'une inspection détaillée périodique (IDP) en 2005 (hors CETU). En avril 2008, une visite commune CG Drôme / CETU a permis de constater de nombreuses dégradations, nécessitant un projet de réparation.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

Le tunnel a été creusé au XIX^e siècle. En 1966, des travaux d'alésage et un revêtement généralisé en béton coffré ont été réalisés (sans étanchéité).

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Le tunnel présente plusieurs types d'avaries :

- multiples zones de venues d'eau très actives en hiver (verglas, stalactites), en particulier au niveau des joints transversaux de bétonnage (*photo 1*) ;
- altération du béton de revêtement due aux cycles gel / dégel et aux sels de déverglaçage et en particulier en base de piédroit (joint de reprise de bétonnage longitudinal) (*photo 2*) ;
- absence de clavage en clé de voûte et sous-épaisseurs localisées du revêtement (voire vides ponctuelles) ;
- dégradation importante de la chaussée et des trottoirs.



Photo 1



Photo 2

Nota bene : des **investigations complémentaires** ont été réalisées en 2010 par scanner 3D (→ gabarit), carottages du revêtement (→ caractéristiques du béton et profondeur de fondation) et radar en voûte (→ épaisseur du revêtement).

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Dans le cadre du projet de réparation de l'ouvrage commandé par le CG de la Drôme, deux solutions ont été proposées par le CETU (cf. étude APROA du CETU de 2011) :

● SOLUTION A (CONSEILLÉE PAR LE CETU)

Traitement **global** par chemisage de la structure existante :

- décaissement de la chaussée ;
- étanchéité par membrane PVC ;
- revêtement en béton coffré.

Montant estimé : 1 520 000 € HT.

● SOLUTION B

Traitements **locaux** du revêtement existant conservé :

- injections d'arrêt d'eau ;
- saignées drainantes
- imperméabilisation ou étanchement du béton altéré ;
- injections de clavage.

Montant estimé : 620 000 € HT.

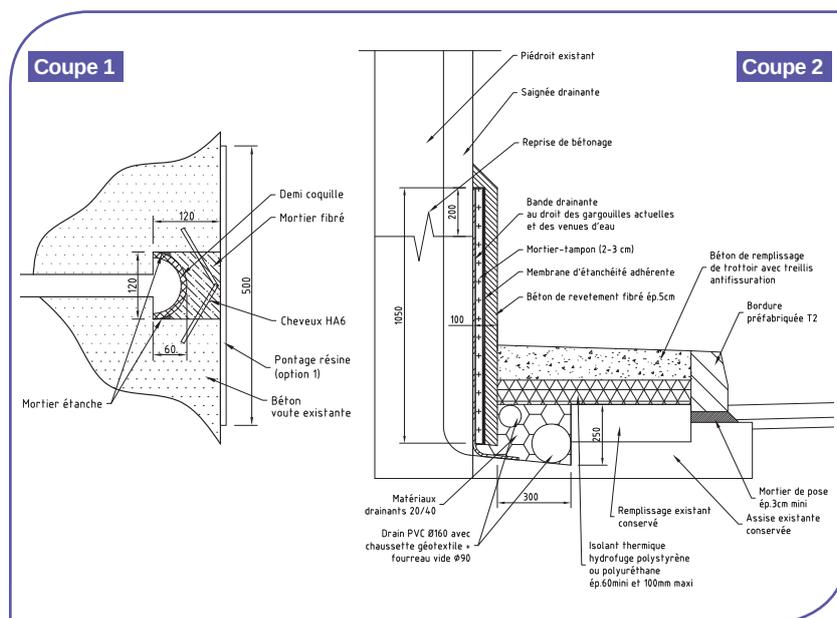
Choix de la **solution B** par le CG 26. Critères prédominants : financier ; minimisation de la gêne à l'usager.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

MOE Études : IOA / AMOA : CETU

Le dossier PRO a permis de définir précisément la solution B (cf. étude PRO du bureau d'études IOA de 2012) :

- clavage des vides à l'extrados par injection de coulis hydraulique ;
- injection des fissures humides par résine PU ;
- drainage de tous les joints transversaux de bétonnage par création de saignées drainantes avec encastrement de ½ coquilles (*coupe 1*) ;
- pontage des saignées drainantes et des fissures injectées par application d'un SELA ;
- étanchement des zones de piédroits très altérés par projection d'un procédé étanche SEPC (*coupe 2*) ;
- imperméabilisation des zones de piédroits moins altérés par enduit d'imperméabilisation ;
- réfection de la chaussée bitumineuse, du drainage longitudinal et des trottoirs (*coupe 2*).



MARCHÉ ET TRAVAUX

Date du marché : mars 2013

Mandataire : AXIMUM

MOE Travaux : CG 26 / AMOE : CETU

Injection de clavage des vides à l'extrados :

- exploitation pendant les travaux : tunnel fermé ;
- localisation des cavités à injecter (via l'exploitation des résultats du contrôle radar) ;
- sciage et démolition des bords des cavités jusqu'à une épaisseur minimale de 4 cm de revêtement (*photo 3*) ;
- forages périphériques pour mise en place des événements et des injecteurs ;
- coffrage ;
- injection de mortier hydraulique « auto-plaçant » ;
- décoffrage à 2 jours.

Réalisation des saignées drainantes :

- exploitation pendant les travaux : tunnel fermé ;
- sciage de part et d'autre des joints existants par rails de guidage (larg = prof = 120 mm) (*photo 4*) ;
- démolition entre les 2 traits de scie pour engravure ;
- réalisation de 4 forages d'appel tubés par engravure ;
- pose de la ½ coquille drainante souple continue ;
- calfeutrement de l'ensemble au mortier de réparation.

Pontage des saignées :

- exploitation pendant les travaux : alternat de circulation ;
- hydrodécapage et ponçage de la zone à ponter (20 cm de part et d'autre de la saignée soit 50 cm de pontage) ;
- ragréage latéral de la saignée au mortier de réparation R4 ;
- application au rouleau (4 passes) d'un SELA (*photo 5*).

Étanchement des piédroits très dégradés :

- exploitation pendant les travaux : alternat de circulation ;
- fraisage du revêtement existant jusqu'à 6 cm de profondeur ;

- clouage de bandes drainantes au droit des venues d'eau ;
- projection VM de 3 cm d'un mortier-tampon ;
- projection VS de 4 mm d'une résine EVA d'étanchéité (*photo 6*) ;
- protection VS de 5 cm de béton de confinement armé de macro-fibres métalliques.

Imperméabilisation des piédroits peu dégradés :

- exploitation pendant les travaux : alternat de circulation ;
- piquage des zones non adhérentes et hydrodécapage ;
- ragréage au mortier de réparation R4 ;
- pose en 2 passes d'un enduit d'imperméabilisation mince.

Injection des fissures humides :

- exploitation pendant les travaux : alternat de circulation ;
- repérage des fissures à traiter ;
- forage en quinconce pour mise en place des injecteurs ;
- injection à la résine PU bi-composants (*photo 7*) ;
- pontage de fissures au SELA comme pour les saignées drainantes (largeur totale = 20 cm).

Réfection de réseaux, trottoirs et chaussée :

- exploitation pendant les travaux : alternat ou tunnel fermé ;
- démolition des trottoirs existants ;
- pose en fond d'assise d'un géotextile de confinement, d'un drain PVC longitudinal Ø160 (récupérant les eaux drainées par les ½ coquilles), d'un fourreau (en réserve) et des divers regards associés ;
- remplissage en matériaux drainants 20/40 (*photo 8*) ;
- isolation thermique par pose de plaques polystyrène à haute résistance à la compression ;
- pose des bordures T2 ;
- remplissage des trottoirs en béton C25/30 XF2 ;
- réalisation de la chaussée bitumineuse.

Photo 3



Photo 4



Photo 5



Photo 6



Photo 7



Photo 8



BILAN DES TRAVAUX

Bilan financier et délai

Montant total : 640 000 € HT.

Délai : 6 mois

→ **Montant et budget respectés.**

Bilan technique

Le sciage des saignées drainantes via le guidage par rail s'est déroulé avec succès :

- cadence soutenue (3 / jour) ;
- bonne tenue de la ½ coquille ;
- géométrie de la saignée parfaitement respectée.

Concernant le pontage par SEL armé, la mise en place s'est bien passée. Seules deux bandes (sur 47 joints) ont dû être reprises (problème de polymérisation de la résine).

Récapitulatif des principaux postes (en € HT)

- saignée drainante : 270 000 € (pour 1 000 ml de joints) ;
- pontage des saignées : 25 000 € (pour 1 000 ml) ;
- traitement des piédroits (très dégradés) par SEPC : 77 500 € (pour 200 m²) ;
- traitement des piédroits (peu dégradés) par enduit mince : 47 500 € (pour 370 m²) ;
- chaussée, trottoirs et réseaux : 134 000 €.

La mise en œuvre du SEPC au niveau des piédroits très dégradés s'est elle aussi bien déroulée.

Une erreur d'agrément s'est produite concernant l'imperméabilisation des piédroits : un enduit mince a été mis en œuvre alors qu'un enduit épais était prescrit. Au regard des conditions d'ambiance du tunnel, sa pérennité dans le temps semble compromise.

SUIVI DE L'OUVRAGE

Une inspection détaillée après travaux a été réalisée en 2014 (hors CETU). Elle note le bon état général de l'ouvrage.

Nota bene :

En 2014 : des travaux d'injections et de pontages de fissures ont été réalisés suite à l'apparition de nouvelles venues d'eau (mobilité de l'eau).

En 2015 : globalement après 2 ans de travaux, les travaux réalisés apportent satisfaction. L'étanchement par SEL armé est intact. De même, le drainage par saignées drainantes et le réseau sous trottoir fonctionnent.

Seul l'enduit d'imperméabilisation mince s'écaille, probablement dû au domaine d'application du produit incompatible avec les conditions sévères du tunnel.



ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Le gestionnaire est satisfait des réparations réalisées.

Cependant, si c'était à refaire, il serait envisagé de :

- augmenter la largeur de pontage en résine armée au droit des saignées drainantes et des fissures (50 cm de part et d'autre, soit 1 m au total) ;
- proposer dans le marché de travaux une tranche conditionnelle intégrant a posteriori l'injection et le pontage de fissures redevenues humides.



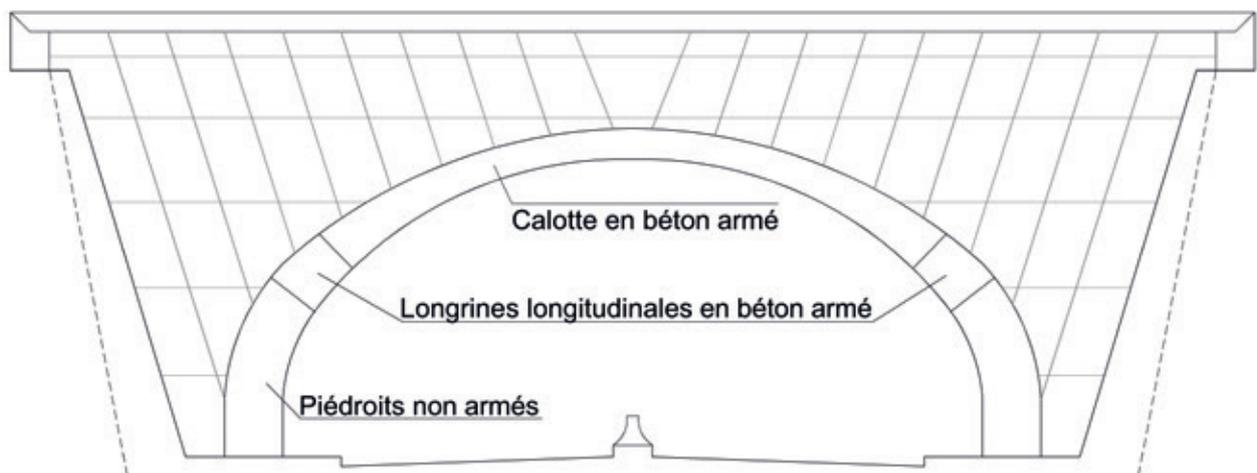
A47 – TUNNEL DE RIVE-DE-GIER

TRAVAUX DE JUIN À OCTOBRE 2015 : RÉPARATIONS SURFACIQUES
 ÉTANCHEMENT PAR SYSTÈME D'ÉTANCHEITÉ LIQUIDE ARMÉ SELA



PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

- **DATE DE CONSTRUCTION** : 1962-1963
- **LOCALISATION** : A47 entre Lyon et Saint-Étienne (42)
- **ALTITUDE** : 277 m
- **CLIMAT** : continental
- **LONGUEUR** : 82 m
- **TYPE DE TUNNEL** : monotube
- **CONDITIONS DE CIRCULATION** :
2 x 2 voies avec séparateur DBA central
- **REPÉRAGE** : le PM0 est situé côté Lyon
le sens + correspond à Lyon – Saint-Étienne
le sens – correspond à Saint-Étienne – Lyon
- **TRACÉ EN PLAN** : alignement droit
- **PROFIL EN LONG** : déclivité de 1,75 %
Profil en travers :
 - voûte elliptique R = 8,5 m sur piédroits H = 1,50 m
 - gabarit : non signalé ; hauteur libre minimale 4 m
 - largeur roulable : 7,30 m dans chaque sens
- **STRUCTURE** :
 - voûte en béton armé coulée sur longrines longitudinales en béton armé, en reins
 - piédroits massifs en béton non armé, coulés en sous-œuvre



SURVEILLANCE

L'ouvrage fait l'objet d'inspections détaillées régulières par le CETU depuis 1979. La dernière inspection avant les travaux a été effectuée en avril 2011.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE

De par sa conception initiale, le tunnel est non étanché. De plus, des éboulements importants se sont produits en demi-section supérieure au cours du creusement, engendrant des vides étayés par des cintres et boisages laissés en place au bétonnage. Les vides ont été comblés par injections mais des venues d'eau sont apparues dès la fin de la mise en œuvre du revêtement.

Les premiers travaux d'étanchéité et de drainage ont été réalisés en 2003. Ils ont consisté à étancher la tête Est par l'extérieur, créer des caniveaux d'évacuation des eaux de ruissellement aux deux têtes et équiper partiellement ou totalement les joints de plots de bétonnage les plus sujets aux venues d'eau (18) de profils de drainage Phoenix PRT.

Ces travaux ne sont pas restés efficaces. En 2011, le rapport d'inspection indiquait que l'état structurel de la calotte continuait de se dégrader. Les désordres constatés montraient l'aspect évolutif du phénomène d'écaillage du béton sur les armatures oxydées et une corrosion avancée derrière les écailles purgées. Des campagnes de purges préventives des écailles en formation, avec passivation des aciers apparents, étaient préconisées.

Les études de réparation du tunnel avec une phase préliminaire de diagnostic ont été commandées au CETU en 2012.

DIAGNOSTIC AVANT TRAVAUX

Le diagnostic a été réalisé en 2013-2014 par le CETU et le Cerema (Dter Centre-Est). Les investigations suivantes ont été menées : repérages d'armatures par radar et Ferroskan®, analyse d'eau d'infiltration, piquages *in situ* et mesure du front de carbonatation, prélèvements de carottes dans le revêtement pour caractérisation du béton (résistance, porosité) et des agressions physico-chimiques auxquelles il est soumis (carbonatation, teneurs en chlorures), mesures de la cohésion superficielle. En complément, un levé de l'intrados de la voûte a été réalisé au scanner 3D.

Ce diagnostic a confirmé les précédents rapports d'inspections de l'ouvrage qui mettaient en évidence la formation d'écailles de béton provoquées par la corrosion des aciers. Il a permis d'établir le lien qui

existe entre la corrosion des aciers et l'avancée du front de carbonatation dans le béton (le béton carbonaté ne protégeant plus efficacement les armatures). Le levé de voûte au scanner effectué immédiatement après une campagne de purge préventive a montré le caractère évolutif du phénomène d'écaillage du béton, la surface de béton altéré ayant doublé entre 2011 et 2014.

Les travaux à réaliser doivent permettre d'éliminer la corrosion des armatures et de reconstituer leur enrobage par réfection localisée du béton, puis d'étancher l'intrados de l'ouvrage, autant pour supprimer toutes les venues d'eau que pour protéger le béton de son environnement et arrêter ainsi la carbonatation responsable de la corrosion des aciers.

PROPOSITION DE SOLUTIONS

Les études ont été menées concomitamment à l'expérimentation ECOMINT (Étanchéité par COques MINces en Tunnel), projet présenté par l'entreprise ETANDEX et sélectionné dans le cadre des appels à projets d'innovation routière du Ministère en charge des transports et dont le CETU était l'évaluateur. Le CETU a donc proposé au maître d'ouvrage de sélectionner le tunnel de Rive-de-Gier comme site d'expérimentation du TECTOPROOF CA, un des trois procédés d'étanchéité du projet ECOMINT.

La solution proposée était donc l'étanchement complet de l'intérieur du tunnel par l'application généralisée du Tectoproof, système d'étanchéité liquide armé (SELA). Au préalable, la voûte devait faire l'objet d'une préparation

selon les zones, par décapage HP, hydro-démolition ou purge mécanique. Ces zones dégradées du revêtement seraient ensuite reconstituées, le dispositif de drainage remis en état et toutes les arrivées d'eau traitées.

Ce principe de réparation devait permettre de répondre aux objectifs définis dans les conclusions du diagnostic de l'ouvrage tout en respectant les contraintes et enjeux principaux du maître d'ouvrage à savoir, l'arrêt des venues d'eau dans le tunnel et l'élimination du risque de chute d'écailles de béton, la préservation de la hauteur libre minimale existante dans l'ouvrage tout en maintenant pendant les travaux la circulation totale en journée et partiellement sur un sens de circulation la nuit.

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA SOLUTION RETENUE

L'APROA a été produit en 2014 et le DCE réalisé au premier trimestre 2015. Parallèlement, la DIR Centre-Est préparait un DCE pour confier la signalisation et le balisage de chantier sur l'autoroute A47 à un prestataire extérieur.

Les exigences d'état du support et thermo-hygro-métriques nécessaires pour l'application du procédé d'étanchement et ses différentes étapes de mise en œuvre ont été décrit dans le dossier d'APROA et traduites en prescriptions contractuelles dans le DCE sur la base du mode opératoire déjà établi par l'entreprise. La faisabilité dans des conditions réelles avait déjà été évaluée sur le chantier test du projet ECOMINT au tunnels des Échelles (73) en 2013.

L'étude détaillée du projet a porté plus particulièrement sur les travaux préparatoires et de réparations nécessaires pour obtenir le bon état du support selon les zones et les différents travaux de traitement préalable des fissures et arrivées d'eau.

Ces travaux comprenaient donc :

- l'hydro-décapage UHP de l'ensemble de la surface pour faciliter l'accrochage des différents produits à mettre en œuvre ;
- la purge et le calfeutrement au mortier de réparation (classe R3 / EN1504-3) des joints secs longitudinaux entre les piédroits et les longrines supportant la voûte ;
- la régularisation du support, sur les piédroits uniquement, par enduit de surfacage de classe R4 ;

- en voûte, la purge et le calfeutrement des arrivées d'eau et fissures suintantes au mortier de colmatage type « plug » y compris la pose de drains de décharge provisoires si le travail se faisait en présence d'eau ;
- traitement des joints transversaux par pontage en bandes d'étanchéité en élastomère collées avec fixation mécanique complémentaire sur les joints équipés de profilés de drainage PRT ;
- le dégagement et la mise à nu des aciers corrodés, la purge des anciens ragréages par moyens mécaniques et hydro-démolition UHP complémentaire ;
- la reconstitution du revêtement et de l'enrobage des aciers dans ces zones par projection de mortier de réparation (classe R4 / EN1504-3), avec l'exigence d'une remise en circulation du tunnel le matin.

La définition et le quantitatif des zones à réparer ont été établis à partir du relevé géométrique de l'intrados par scanner 3D réalisé lors du diagnostic et d'un relevé par l'entreprise ETANDEX pendant la préparation du marché. Ce relevé contradictoire a permis, comme le souhaitait chacune des parties, de conclure un marché à prix global forfaitaire.

En complément du procédé d'étanchement, il a été prévu lors du projet l'application d'une couche de peinture de finition blanche sur les piédroits. De plus, le maître d'ouvrage a demandé d'inclure, lors de la préparation du marché de travaux, le décapage et la remise en peinture des parements aux têtes de l'ouvrage. Ces travaux, plus courants, ne sont pas décrits dans la présente fiche.

MARCHÉ ET TRAVAUX

Marché de travaux : mai 2015 – Entreprise : ETANDEX

Marché de signalisation : mars 2015 – Entreprise : COIRO

Maîtrise d'œuvre : DIR Centre-Est

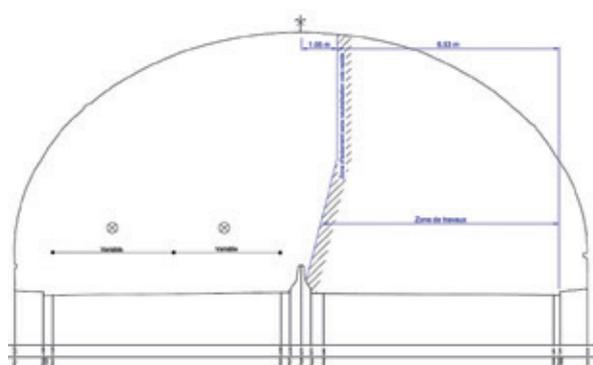
Assistance maîtrise d'œuvre : CETU

Contrôle Extérieur : Cerema DterCE, Laboratoire de Lyon

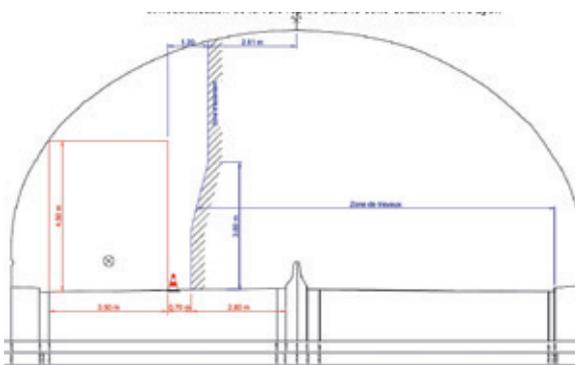
Coordination SPS : PRESENTS

- Travaux effectués exclusivement de nuit de 21h à 4h30 (coupure effective de 20h30 à 6h).
- Un seul sens de circulation fermé, dévié par le centre de Rive-de-Gier.
- Circulation du sens opposé maintenu en totalité ou partiellement pour les travaux en clé de voûte.

Sens de circulation opposé maintenu



Sens de circulation réduit à une voie



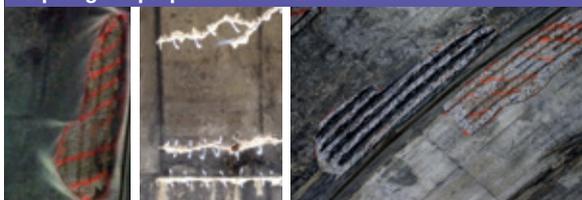
Principe d'exploitation du tunnel pendant les travaux

- Hydronettoyage généralisé de la voûte.
- Hydrodécapage UHP 2000-2500 bars des piédroits (élimination du revêtement en peinture existant).
- Sondage, délimitation et piquage des zones de béton altéré.
- Dégagement et décapage des aciers par hydro-démolition UHP.
- Traitement des fissures (arrêts d'eau, calfeutrement, injection si nécessaire).

Atelier d'hydronettoyage



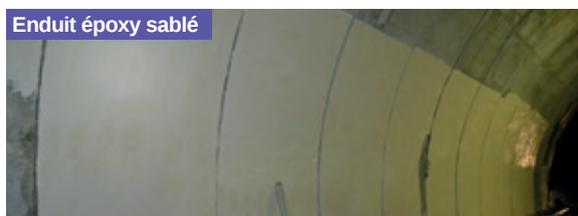
Repérage et préparation des zones altérées



Décapage et préparation du support

- Objectif esthétique et d'obtention de la cohésion minimale de 1,5 MPa nécessaire à l'application du procédé d'étanchéité.
- Mesures de la cohésion initiale du support et essais de convenance du ragréage.
- Décision de remplacer le mortier prévu par un enduisage à la pâte époxydique sablée (cf. Bilan des travaux).

Enduit époxy sablé



Ragréage de surfaçage des piédroits

Réparation de surface ou de ré-enrobage des aciers dégagés en plusieurs étapes :

- application d'un primaire époxy d'accroche (*photo 1*) ;
- projection frais sur frais d'un mortier de réparation classe R4 (*photo 2*) ;
- dispositif de cure par feutre humide et film plastique (*photo 3*).

La procédure était répétée pour chaque passe mise en œuvre.

Photo 1



Photo 2



Photo 3



Traitement des zones purgées

Mise en œuvre des bandes en deux étapes espacées de 24 heures :

- la première nuit, application d'une pâte époxy de part et d'autre du joint, encollage de la bande et marouflage pour éliminer les poches d'air ;
- la seconde nuit, application d'une deuxième passe sur les bords de la bande pour fermer le pontage.

Dans certaines saignées, des venues d'eau ont été canalisées par des demi-coquilles bloquées au mortier d'arrêt d'eau. En clé de voûte, les bandes ont été laissées en attente lors de la première phase de travaux (sens 1) pour être assemblées par soudage lors des travaux de la seconde phase (sens 2).



Pontage des joints de plots par bande élastomère

Le procédé Tectoproof CA a été mis en œuvre selon la procédure d'exécution et de contrôles, bien maîtrisé par l'entreprise pour ce troisième chantier expérimental.

En absence d'exigence de tenue au feu dans ce tunnel court, le phasage, et donc le sens d'application des lés de tissu de verre, a été défini en fonction des contraintes d'exploitation notamment pour la mise en œuvre du procédé en clé de voûte.*

Application du primaire époxy au rouleau et saupoudrage de silice qui créer l'accroche des couches suivantes.

Lissage à la pâte époxydique



Application du primaire



Application de la première couche de résine puis déroulage et marouflage du tissu de verre dans la résine fraîche.

Pose verticale en piédroits



Pose longitudinale en voûte



Fermeture du système avec une deuxième couche de résine époxydique, choisie de couleur grise en voûte. En piédroits, la résine a été sablée à refus pour l'accroche de la peinture de finition blanche à venir.

Deuxième couche de résine teintée grise



* Lorsque des exigences de tenue au feu sont à retenir, des dispositions particulières sont à mettre en œuvre (consulter le CETU).

Application du SELA TECTOPROOF CA

BILAN DES TRAVAUX

Bilan financier et délai

Montant initial du projet : 786 492 € TTC.

→ **Montant final des travaux : 811 282 € TTC.**

Les conditions d'exploitation et de stationnement à proximité du chantier ont occasionné des frais supplémentaires pour l'entreprise, notamment en moyens d'accès et de travail en hauteur. Ces frais ont été partiellement pris en charge par le maître d'ouvrage.

Les montants sont indiqués hors marché d'exploitation et frais de maîtrise d'ouvrage (CSPS, communication, etc.).

Délai contractuel : 5 mois

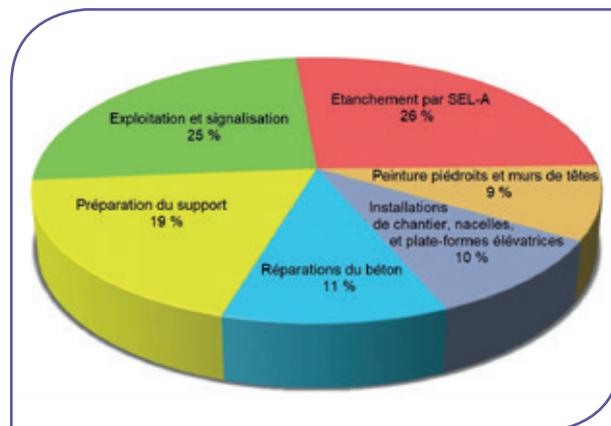
→ **Délai respecté avec 4 jours d'avance.**

Bilan technique

Les principales difficultés de ce chantier ont été rencontrées pendant les travaux de la première phase (sens 1) et causées par la porosité du béton existant et les fortes températures du début d'été 2015 :

- remplacement du mortier de ragréage en piédroits par une résine époxydique ;
- procédure spécifique d'accroche et de cure des réparations en voûte ;
- difficulté d'application et de maintien immédiat des bandes de pontage.

L'expérience acquise a ensuite permis de rattraper le retard pendant les travaux de la seconde phase (sens 2).



Cadences

Hydronettoyage voûte : 144 m² / nuit

Hydrodécapage piédroits : 55 m² / nuit

Pontage par bandes élastomère : 4 u / nuit (par 1/2 voûte de 14 ml)

Tectoproof (moyenne) : 66 m² / nuit

SUIVI DE L'OUVRAGE

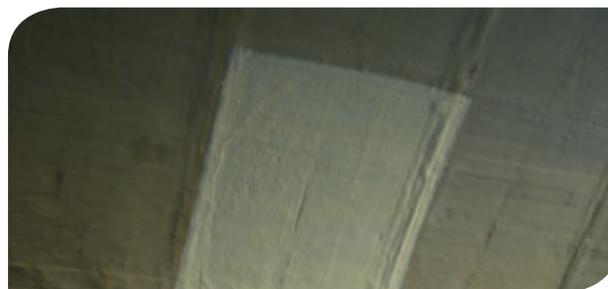
Une inspection détaillée initiale (IDI) a été réalisée en novembre 2015, distinctement des opérations préalable à la réception de l'ouvrage. Le protocole d'expérimentation du procédé d'étanchéité innovant prévoit des visites annuelles de suivi et une nouvelle inspection détaillée (IDI+3) a été réalisée en avril 2018.

En 2015 : un seul point de fuite est repéré, humide mais sans goutte-à-goutte.

En 2016 : 19 zones de 1 à 3 points de fuites sont repérées ; les points étaient secs ou légèrement humides (goutte-à-goutte).

En 2017 et 2018 : 32 zones sont repérées mais sans débit de fuite, la plupart des points de fuite étant calcifiés.

Un décollement localisé du complexe d'étanchéité a été détecté en 2017 et réparé en marge de l'IDP de 2018. Il était dû à une accumulation d'eau au droit d'une bande de pontage fuyante. La réparation a été effectuée dans le cadre de la garantie prise par l'entreprise.



ET SI C'ÉTAIT À REFAIRE...

Le gestionnaire est pleinement satisfait de l'étanchéité réalisée. Il n'y a plus eu d'opération d'enlèvement de stalactites dans l'ouvrage depuis 2015. De plus, les travaux ont permis de supprimer les risques de chutes d'écaillés de béton identifiés lors des précédentes inspections. L'ouvrage est considéré en bon état apparent selon la classification IQOA.

Cependant, si c'était à refaire, il devrait être prévu dans la rédaction du marché :

- un meilleur encadrement de la mise en œuvre d'une cure pour les travaux réalisés aux mortiers de réparation aux conditions d'emploi strictes ;
- une visite contradictoire avec l'entreprise en fin de garantie de parfait d'achèvement, les points des fuites étant difficilement détectables lors de la réception malgré un contrôle systématique.

3.9 ANALYSE DES FICHES CHANTIERS

Les méthodes de traitement des venues d'eau sont traditionnellement classées en deux grandes catégories :

- les dispositifs de drainage ;
- les procédés d'étanchéité.

Ce classement est repris ci-dessous.

3.9.1 Retours d'expérience sur les dispositifs de drainage

Saignées drainantes avec profilé

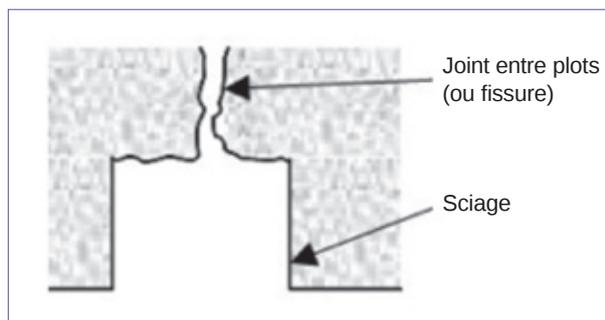
Ce type de dispositifs de drainage linéaire s'utilise dans les ouvrages revêtus (béton ou maçonnerie), au droit d'une fissure ou au niveau des joints de bétonnage d'anciens ouvrages non étanchés.

Le principe commun aux différentes techniques de réalisation des saignées drainantes avec profilé est de réaliser une engravure à la surface du revêtement et d'y insérer un profilé afin d'assurer le drainage de l'eau jusqu'à la base des piédroits, où elle doit être collectée et évacuée vers l'extérieur (cf. § 3.9.3). Cette technique de drainage linéaire présente l'avantage de ne quasiment pas impacter la section de l'ouvrage. De plus, ces drains peuvent être nettoyés en cas d'eau très incrustante, par simple enlèvement et remise en place.

Il est important de connaître le caractère incrustant de l'eau captée afin d'éventuellement surdimensionner la demi-coquille pour retarder son colmatage.

Les principales étapes de réalisation sont :

- réalisation par sciage d'une engravure : sa géométrie (parallélisme des bords) doit être très soignée pour assurer ensuite l'étanchéité avec le profilé inséré (même si un traitement confortatif reste indispensable). Pour une bonne réalisation, il est nécessaire d'employer une scie avec au minimum trois lames et d'utiliser un rail de guidage de l'outil. Le dimensionnement de cette engravure doit être suffisant, notamment pour prendre en compte un éventuel encrassement par dépôt de calcite (selon la nature des eaux rencontrées). Dans les ouvrages qui y sont soumis, la problématique de gel doit également être prise en compte.



- mise en place du profilé dans l'engravure : elle doit préserver l'intégrité du profilé et être réalisable facilement sur chantier, sur toute la développée de la voûte de l'ouvrage.

Les techniques utilisées par le CETU ont évolué au fil des années.

Les profilés PRT (rentrés à « force ») ont été utilisés en 1994 dans le tunnel du Rond-Point (Fiche chantier 04), avec des soucis liés en particulier à un choix de joint trop étroit (largeur de 60 mm).

En 1999, ce type de drainage a été de nouveau posé dans le tunnel de Montcenis (Fiche chantier 06), avec cette fois-ci des profilés PRT 100 et non 60. Quelques fuites se sont manifestées sur les flancs latéraux des joints, à cause de la mauvaise qualité des parements de l'ouvrage. Il est également apparu qu'il est nécessaire de réaliser des regards à la base des profilés pour éviter des remontées d'eau et des fuites sur le trottoir.

Une autre source de fuite a été identifiée dans d'autres ouvrages, liée à la méthode de sciage de la saignée : réalisée en deux fois en partant de la base des piédroits vers la clé, le raccordement en clé n'était pas parfait et deux demi-profilés avaient été mis en place, causant une fuite au raccordement en clé.

En 2003, cette technique a été mise en œuvre avec toutes les précautions possibles dans le tunnel de Rive-de-Gier. Cependant, des fuites latérales liées à la mauvaise qualité de mise en œuvre du béton, assez fréquente en about de coffrage, ont été observées. Leur prévention ou leur traitement nécessiteraient un traitement confortatif sur une largeur d'environ 1 m (centrée sur le drain), mais cela ferait perdre une bonne partie de l'intérêt de ce type de drains **amovibles**.

Par ailleurs, ce type de drainage nécessite, en tunnel routier, d'être fixé par des barrettes en inox pour ne pas être arraché par des frottements dus au trafic poids-lourds (en particulier lorsqu'en période de gel intense, le gel fait parfois légèrement saillir le profilé par rapport à la surface du parement).

Des drains encastrés ont donc été préférés et mis en place dans le tunnel de Marquaires en 2006 comme indiqué dans la Fiche chantier 10. Le résultat s'est avéré probant mais le mode de mise en place des profilés préformés en EPDM est assez délicat et, lors d'une utilisation ultérieure de ce procédé, les venues d'eau importantes pendant la pose ont posé de sérieuses difficultés liées à la tenue de la colle de maintien en présence d'eau pendant les travaux.

Un type de drain plus basique mais pouvant tenir en place seul pendant son installation est donc finalement retenu et le type de saignées drainantes recommandées à ce jour est décrit dans la fiche de cas 12 du tunnel du col de Menée en 2013.

Les différentes étapes sont présentées dans la Fiche chantier correspondante. Les points sensibles sont le sciage avec un rail de guidage sur l'ensemble de la section transversale, la collecte des eaux dans un collecteur en base de piédroits et surtout la mise en œuvre d'un traitement confortatif par SEL-A.



Illustration 6 : Tunnel du Col de Menée – Saignée drainante avec traitement confortatif

Nota bene : les saignées drainantes **sans profilé** ne sont pas traitées ici car elles sont moins efficaces et sont refermées par des systèmes en saillie (capot métallique...). Elles ne sont donc pas recommandées dans les tunnels routiers.

Bandes drainantes recouvertes de béton projeté

Ce type de dispositifs de drainage linéaire est techniquement utilisable dans tous les types d'ouvrages.

Le principe consiste à drainer l'eau grâce à des bandes (ou lés) de géosynthétique de drainage disposés sur des zones d'infiltration linéaires. Ces bandes sont ensuite recouvertes d'une épaisseur de 5 à 7 cm de béton projeté⁹ (voir Illustration 7). Cette méthode est utilisable pour le traitement d'infiltrations dans un ouvrage où les venues d'eau sont localisées et dans lequel on admet un débit de fuite résiduel. Elle a été mise en œuvre dans le Grand Tunnel de la RD 926 (Fiche chantier 11).

Afin d'éviter l'emploi de treillis soudé, on utilise généralement des géospaceurs à excroissances avec une face spécifiquement traitée pour faciliter l'accroche du béton projeté (type « Delta PT »).

Il est préférable, pour éviter les ruissellements d'eau le long des piédroits et sur les trottoirs (voire sur la chaussée), que les géosynthétiques de drainage soient mis en œuvre jusqu'à la base des piédroits et raccordés au réseau de collecte longitudinale (cunette, caniveau à graviers¹⁰...).

En cas de risque de gel élevé, des isolants thermiques (mousse PE ou PU) peuvent être ajoutés au dispositif afin d'éviter l'accumulation de glace à l'arrière du géosynthétique. Dans ce cas, l'usage d'un treillis soudé dans le béton projeté est conseillé car le gel peut générer des pressions au droit des bandes drainantes.

9. Le béton projeté peut être remplacé par un mortier ou enduit hydrofuge pour diminuer le débit de fuite résiduel.

10. Cf. § 3.9.3 Collecte des eaux drainées.



Illustration 7 : Projection de béton sur bandes drainantes

Problématique des forages d'appels

En complément des dispositifs cités ci-dessus (saignées et bandes drainantes), des forages d'appels ont parfois été réalisés ; ils apportent une plus-value intéressante en guidant les venues d'eau vers les dispositifs drainants. Ces forages sont surtout préconisés **dans les structures dégradées** (fissures nombreuses entre joints de coffrage, mortier de jointoiement fragile). La profondeur de ces forages doit être étudiée en fonction du type de structure afin de pas augmenter les débits d'eau (dans un ouvrage maçonné notamment, on ne cherchera pas à aller au-delà de l'épaisseur de la structure) ; ces forages sont souvent réalisés en biais afin de maximiser leur efficacité (en particulier à l'arrière d'un revêtement en béton). Il est également recommandé de les équiper de tubes crépinés afin de limiter leur encrassement et d'empêcher le lessivage des fines du terrain (voir Illustration 8). À l'inverse, **sur une structure en bon état**, il n'est pas nécessaire de concentrer les venues d'eau vers les saignées et on évite donc ce type de forage pour éviter le risque d'appel d'eau supplémentaire.



Illustration 8 : Tunnel du col de Menée – Forage d'appel dans une saignée équipée d'un tube filtrant

Coques de drainage ancrées

Ce type de dispositifs de drainage généralisé est techniquement utilisable dans tous les types d'ouvrages pour lesquels les venues d'eau sont nombreuses et diffuses.

Il s'agit de mettre en place des dispositifs de drainage recouverts de béton projeté armé¹¹. La difficulté réside dans la jonction entre nappes drainantes et dans le traitement des traversées de nappes.

Dans le cas des Fiches chantiers (respectivement 1 et 2) des tunnels du Grand Clôt et des Échelles, les coques drainantes avec plaques « éthafoam » n'ont pas empêché un débit de fuite résiduel. Les plaques drainantes (et isolantes dans ce cas) sont fixées au support et soudées entre elles. Leur mise en œuvre conduit à de nombreux points de faiblesse, notamment le traitement des ancrages traversant les plaques et le soudage entre plaques.

L'ancrage de la coque se fait par des tiges qui peuvent être scellées chimiquement ou mécaniquement. Le scellement chimique des ancrages apporte une certaine étanchéité, mais il est néanmoins nécessaire de réaliser un traitement individuel (mastic ou autres) de chaque traversée de nappe. On compte en général de 4 à 8 traversées par m², ce qui multiplie le nombre de traitements et, *in fine*, rend le risque de fuite important (voir Illustration 9).

Les opérations pour la pose du treillis (pliage des ancrages, soudures, ligatures) doivent être soignées pour ne pas détériorer le traitement des traversées. Il faut notamment éviter au maximum le pliage des ancrages après leur scellement. Le positionnement du treillis doit être précis afin d'assurer un bon enrobage des aciers.

Le retour d'expérience de ce type de coques réalisées avec des plaques « éthafoam » montre une faible efficacité.

D'autres types de dispositifs de drainage peuvent être utilisés (par exemple des nappes de géospaceur à excroissances ou des géocomposites), mais les résultats seront de même nature.



Illustration 9 : Tunnel du Roux – Ancrage du treillis soudé d'une coque drainante

Risques liés aux zones de drainage surfaciques recouvertes de béton projeté non ancré

On rencontre parfois des cas intermédiaires entre les bandes de drainage linéaire (dont la largeur est généralement de 35 cm seulement) et les coques de drainage généralisé : des zones surfaciques de plusieurs mètres carrés sont recouvertes d'un béton non ancré dont le risque de chute peut être important si son épaisseur est trop élevée et si la zone est étendue. Ceci est particulièrement sensible dans les zones de têtes soumises aux contraintes climatiques.

Nota bene : la mise en œuvre de nappes de drainage apparentes (non recouvertes) est déconseillée (comportement au feu, risque d'arrachage...).

Tôles parapluies

Ce type de dispositif de drainage généralisé est techniquement utilisable dans tous les types d'ouvrages confrontés à des venues d'eau diffuses.

Il est constitué de tôles nervurées cintrées pour suivre la géométrie de l'ouvrage et traitées contre la corrosion. La jonction entre tôles est un élément important de la pérennité du drainage.

Un point très important concerne la démontabilité des tôles. Il est très important que les tôles parapluies puissent être facilement démontables. En effet, l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) prévoit des inspections détaillées périodiques « au contact » de l'ensemble de la structure. Sa bonne application nécessite donc un démontage complet des tôles avant chaque inspection. La nature des matériaux des tôles et des fixations, ainsi que la conception de la pose, doivent permettre de garantir la démontabilité sur le long terme, notamment vis-à-vis des risques de corrosion.

Les démontages sont également utiles pour s'assurer de la pérennité des ancrages, qui constitue un point de vigilance important à long terme. Au droit de certaines zones spécifiques de la structure (exemple : fissures évolutives), il est possible de prévoir des dispositifs de trappes permettant une inspection visuelle localisée rapide du désordre.

De manière générale, la durée de vie des tôles dépend fortement du niveau de corrosivité de l'ouvrage et du caractère « agressif » des eaux d'infiltrations ; elle est nettement plus courte que celle des procédés pour lesquels nous disposons de longs retours d'expérience, tels que les chemisages ou les coques indépendantes. La caractérisation physico-chimique des venues d'eau doit être réalisée préalablement au niveau des études amont.

11. Le béton projeté peut éventuellement être recouvert d'un mortier de protection passive contre l'incendie (idem pour les coques autoportantes d'étanchéité).

En fonction de la géométrie de la voûte, pour les ouvrages au rocher, il n'est pas toujours possible de déterminer un unique profil géométrique des tôles pour couvrir la totalité du linéaire. Dans ce cas, le coût de cette technique devient souvent élevé. Il en est de même pour un ouvrage courbe.

La longueur des ancrages peut facilement être adaptée « sur mesure » à la géométrie de l'ouvrage. Par ailleurs, il est nécessaire d'anticiper, dans la mesure du possible, la pose des équipements, mêmes légers, pour que les ancrages correspondants soient spécifiquement dimensionnés. À défaut, il peut être prudent de surdimensionner toute une zone d'ancrages.

L'attention est attirée sur le fait que ces tôles ne sont normalement pas dimensionnées pour résister à des chutes de blocs alors même qu'elles empêchent la surveillance de la structure, ce qui constitue un inconvénient majeur. Il est donc indispensable de s'assurer de la bonne tenue de cette structure (à court et à long terme) avant la mise en place des tôles, en effet l'expérience montre que leur démontage est très rarement fait.

Sous réserve de respecter les revanches latérales, il est possible d'éviter les ruissellements visibles de l'eau sur les piédroits en faisant descendre ces tôles jusqu'à leur base, comme recommandé dans la Fiche chantier 05 sur le tunnel du Grand Chambon. Les eaux sont ensuite reprises dans un caniveau (ou autre dispositif de collecte). Si les tôles doivent être arrêtées plus haut, ce dispositif de collecte doit être jointif avec le piédroit afin de collecter le maximum des eaux ruisselantes. Le résultat est souvent insatisfaisant.

Les tôles parapluies présentent l'avantage d'être facilement lavables et de pouvoir être peintes (voir Illustration 10).



Illustration 10 : Tunnel du Chat – Tôles parapluies peintes en piédroit

Leur rapport « efficacité à court terme / coût » est très favorable, cependant, le fait qu'elles soient un frein important à la surveillance et à l'inspection de l'ouvrage incite à n'y recourir qu'en dernier recours ou sur des portions très limitées.

Un dispositif de même nature que les tôles parapluies a été mis en place sur les piédroits du tunnel de Marquaires : une nappe drainante protégée de tôles inox a été utilisée en piédroits dans une zone de contraintes géométriques très sévères (cf. Fiche chantier 10 « Tunnel de Marquaires (2) »).

Autres dispositifs drainants apparents

Le **captage** est utilisé pour drainer une arrivée d'eau ponctuelle jusqu'à un exutoire en base de piédroit. S'il peut être intéressant en drainage provisoire, ce dispositif en saillie est à éviter en drainage définitif dans les tunnels routiers (risque d'arrachement).

Les **pontages drainants** sont utilisés en recouvrement linéaire d'un défaut fuyant (fissure, joint de plots de bétonnage...). Pour cela, on peut utiliser des dispositifs métalliques (capot chevillé au support) ou synthétiques (bande PVC collée ou fixée au support via une tôle colaminée). Ces dispositifs sont à éviter dans les zones de fort gel. En matière de réaction au feu, conformément à la note d'information n°25 du CETU, les matériaux constitutifs doivent être au minimum M1.

Traitement confortatif sur drainage linéaire

Le traitement confortatif (pontage et/ou retour technique) doit être constitué d'un procédé d'étanchement intrados. Il est nécessaire que ce traitement soit réalisé avec un procédé d'étanchéité et non d'imperméabilisation. On évite donc les enduits hydrauliques et les SIL (ne résistant pas à la fissuration) et on utilise plutôt un Système d'Étanchéité Liquide Armé SEL-A, parfois associé à une bande synthétique collée en pontage.

Pour une bonne efficacité, le traitement confortatif est réalisé sur 50 cm minimum de part et d'autre du joint. Cette largeur est à ajuster en fonction de la qualité du béton constatée localement. Sous ces conditions, on peut considérer que le drainage linéaire associé à un traitement confortatif cumulant pontage et retours techniques, peut être considéré comme un procédé d'étanchéité linéaire efficace.

3.9.2 Retours d'expérience sur les procédés d'étanchement

Nota bene : tous les procédés d'étanchéité mis en œuvre sur des ouvrages en maçonnerie nécessitent de prendre en compte la pérennité des pierres et des joints, qui ont besoin de « respirer » pour assurer leur durabilité. C'est pourquoi, en maçonnerie, étanchement et drainage sont obligatoirement associés.

Injection d'arrêt d'eau

Ce type d'étanchement est techniquement utilisable dans tous les types d'ouvrages confrontés à des venues d'eau ponctuelles ou linéaires (à travers des joints ou fissures).

Conformément à la recommandation de l'AFTES GT9R1F3 (TES 257), les injections d'arrêt d'eau permettent « seulement » de bloquer provisoirement les arrivées d'eau. Elles constituent un traitement de pré-étanchement du support et doivent être complétés par un traitement confortatif étanche qui assure la durabilité de la réparation.

Il existe un très grand nombre de familles de coulis d'injection (acrylique, polyuréthane, époxy, minéral...) qui possèdent chacune un domaine d'utilisation propre en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques.

Le lecteur se réfèrera au chapitre 4 de la recommandation de l'AFTES GT9R1F3, qui donne de nombreuses spécifications techniques sur les injections d'arrêt d'eau (propriétés, domaine d'application, éléments de choix, mise en œuvre, garantie, etc.).

Le retour d'expérience montre que les traitements d'injection d'arrêt d'eau déplacent souvent les arrivées d'eau vers une autre zone (poreuse ou fissurée) initialement non fuyarde. C'est pourquoi, afin de prendre en compte ce phénomène, il est conseillé de prévoir une tranche de travaux avec des injections complémentaires dans l'année suivant les premiers traitements.



Illustration 11 : Tunnel du Rousset – Injection de mousse PU en voûte

Mortiers ou enduits d'imperméabilisation

Ce type de procédé est adapté aux tunnels revêtus en béton. Dans les ouvrages en maçonnerie, une étude au cas par cas doit être faite car les pierres peuvent être endommagées si leur « respiration » n'est plus possible à travers les joints.

Les enduits d'imperméabilisation, par nature, ne résistent pas à une fissuration appréciable du support (cf. § 3 Terminologie). En conséquence, après un temps plus ou moins long, les venues d'eau au travers de la fissuration sont quasi systématiques, en particulier avec les enduits minces (cf. Fiche chantier 12 sur le tunnel du col de Menée). Elles réactivent alors bien souvent les contraintes d'exploitation ou les inconvénients qui avaient conduit à la nécessité de travaux. Leur emploi n'est donc pas recommandé.

Chemisage

Le chemisage d'un ouvrage consiste à mettre en place une étanchéité par DEG-S protégée par un revêtement en béton coffré.

Ces travaux s'apparentent à la construction d'un tunnel neuf étanché par DEG-S et sont donc possible dans tous les types d'ouvrage mais ils nécessitent un espace disponible important.

Les exigences de qualité du support (géométrie, traitement des venues d'eau) sont les mêmes que pour les travaux neufs. De la même façon également, le bon remplissage du béton en clé de voûte est primordial (cf. § 5.4.2 Injections structurelles), en effet tout défaut de « clavage » crée une communication entre les compartiments du DEG-S. Des injections de coulis de ciment sont nécessaires, après le bétonnage pour assurer un remplissage complet de la voûte. En cas de défaut de clavage important, la structure elle-même peut être fragilisée.

Un autre point d'attention est le raccordement de l'étanchéité en base de piédroit, afin d'éviter toute intrusion d'eau à la jonction entre le chemisage et le trottoir.

Les différentes étapes de ces travaux sont présentées dans la Fiche chantier 09 du tunnel de Marquaires. Dans cet ouvrage, la diminution de 60 cm de la largeur de l'ouvrage avait été acceptée par le maître d'ouvrage en regard du très faible trafic dans ce tunnel.

Un décaissement de l'ancienne chaussée est normalement associé à une réparation par chemisage en béton coffré (cf. § 4.3 Décaissement de chaussée), *a minima* dans l'épaisseur de la chaussée existante. Lorsque le décaissement prévu est supérieur à l'épaisseur de la chaussée, il est prudent de réaliser des fenêtres de reconnaissance pour vérifier la profondeur des fondations et la qualité du terrain d'appui. Si la fondation du chemisage doit se trouver sous le niveau actuel des fondations, on peut être amené à renforcer la tranche de terrain sous l'ancienne fondation. Ce renforcement peut être réalisé par béton projeté et ancrages ou en décaissant par plots alternés et en construisant la nouvelle fondation plots après plots, en pianotage. Dans toute la mesure du possible, il convient d'éviter une réalisation du décaissement par plots alternés car cette disposition complique beaucoup les travaux.

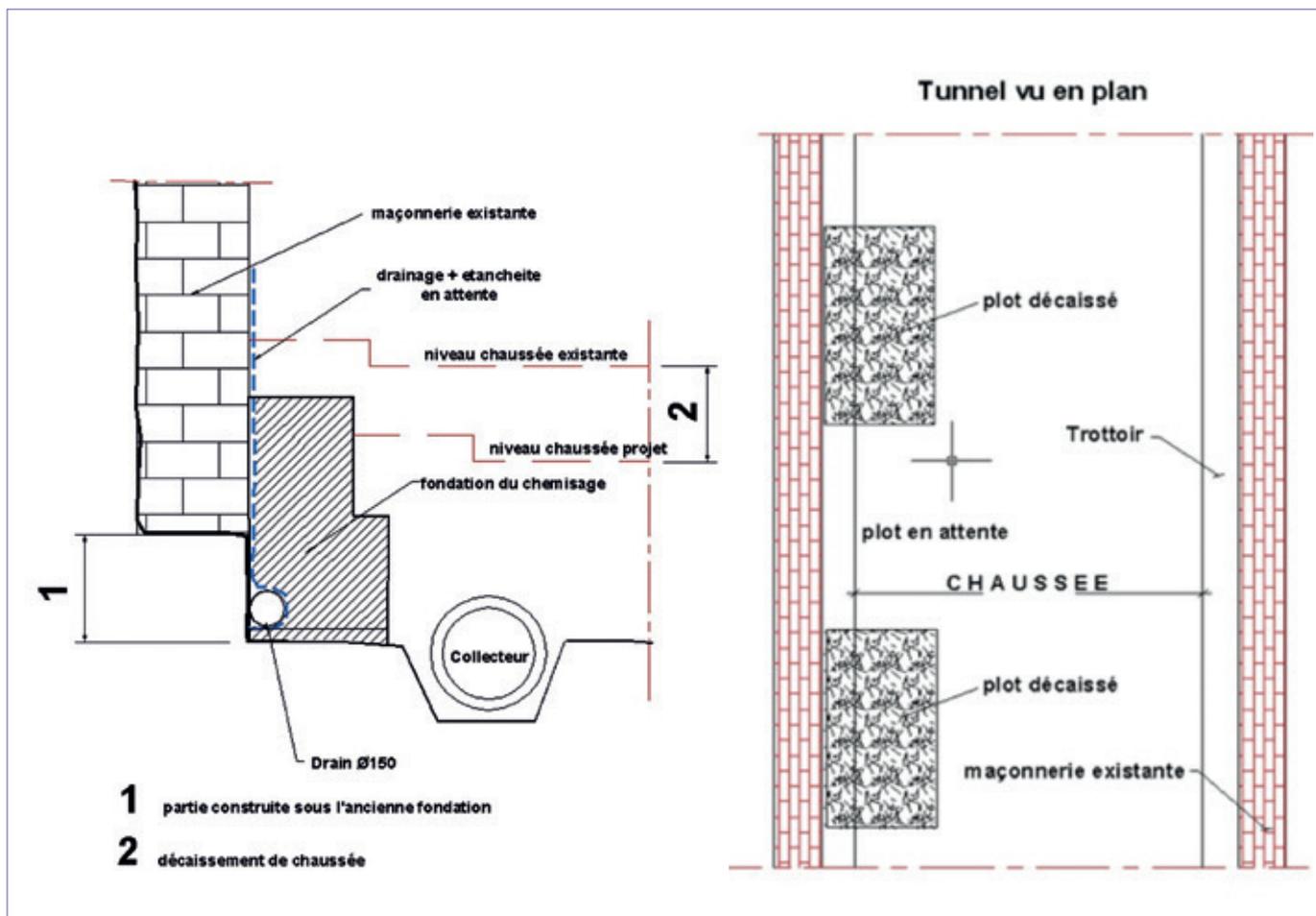


Illustration 12 : Coupe sur nouvelle fondation et travaux par plots alternés

Pour optimiser l'épaisseur d'un chemisage en béton, il est possible d'utiliser un béton autoplaçant qui autorise un coulage en épaisseur réduite, jusqu'à 20 cm environ, alors qu'en béton traditionnel, une épaisseur minimale de 30 cm est nécessaire pour la bonne mise en œuvre du béton dans le coffrage. La première voûte de tunnel en béton auto-plaçant a été réalisée en France, dans le tunnel des Monts, sur la voie rapide urbaine de Chambéry, en 2005¹².

Coques d'étanchéité indépendantes

Ce type de procédé peut être utilisé dans tout type d'ouvrage moyennant la résolution du problème de l'espace disponible.

On consultera à ce sujet à la note d'information n°15 du CETU, d'octobre 2006. Il s'agit de coques en béton projeté armé autoportant, portant une étanchéité de type DEG-S.

Le raccordement du DEG-S de la coque indépendante à celui en attente (en pied de coque) se fait par soudure avec la membrane PVC en attente (généralement celle du piedroit préalablement réalisé). C'est un point sensible, car il est réalisé dans un espace réduit. Un raccordement défectueux à ce niveau peut entraîner des arrivées d'eau, préférentiellement par le joint de reprise de bétonnage.

La fabrication de l'ossature nécessite une zone de chantier de dimensions importantes et le plus près possible du tunnel pour faciliter le transport de l'ossature dans l'ouvrage. Pour le déplacement et la mise en place de l'ossature, des engins de chantier très spécifiques sont nécessaires.

Ce procédé peut être employé dans beaucoup de configurations d'ouvrage. Il est présenté dans les Fiches chantier 03, 07 et 08 des tunnels du Resquiadou (1994), de la Giettaz (2001) et de Sisteron (2003) respectivement.

Sa principale contrainte d'application est liée à son épaisseur (environ 20 cm). Le plus souvent, pour mettre en œuvre ce procédé tout en conservant le gabarit, il sera nécessaire de dégager un volume supplémentaire, en décaissant la chaussée par exemple.

Un avantage notable du procédé est que les équipements légers du tunnel (éclairage notamment) peuvent être fixés à la coque sans l'endommager (puisque leurs ancrages ne traversent pas l'étanchéité).

Les contraintes d'exploitation pendant la phase travaux sont également limitées (fermetures totales de l'ouvrage de nuit par exemple, mais réouverture possible en journée).

12. Se reporter par exemple à l'article « Tunnel des Monts : L'innovation d'un revêtement mince en B.A.P », *BTP Matériaux*, n°45, novembre 2006, p. 8-10.

Pour assurer la pleine efficacité du procédé, il est recommandé de réaliser des piédroits en béton coulé d'une hauteur adaptée pour permettre la soudure à hauteur d'homme des géomembranes PVC des parties hautes et basses à l'arrière de ce piédroit. Dans un ouvrage présentant un virage serré, il est possible de réaliser les piédroits en béton projeté avec une finition talochée donnant un résultat quasi identique à celui obtenu avec un béton coulé mais s'affranchissant de la difficulté liée à la courbure.



Illustration 13 : Piédroits en béton projeté taloché au tunnel des Aravis

Un système de collecte suffisamment dimensionné et visitable en tout point doit être mis en place en base de piédroits.

Pour une meilleure durabilité, il est préférable d'éviter la pose de coque sur des supports en encorbellement dont les ancrages pourraient se corroder, cette dégradation éventuelle étant impossible à détecter lors des inspections détaillées.

Dans le cas de réalisation de ces coques dans un tunnel « au rocher », une inspection préalable aux travaux doit être réalisée par un géologue pour détecter d'éventuelles instabilités du massif. Si des instabilités sont constatées ou redoutées, des travaux préalables de purge et soutènement (boulonnage, béton projeté) sont à prévoir. Il est également possible d'utiliser un procédé de « coques plaquées », mises en contact avec la géométrie existante de l'ouvrage et assurant la triple fonction de soutènement, étanchéité et revêtement (cf. l'exemple du tunnel de la Reyssolle au § 10.2.3 des recommandations du GT9 de l'AFTES sur les traitements d'arrêt d'eau [GT9R1F3, 2016]).

Les différents retours d'expérience montrent que ce procédé offre une bonne efficacité et une durabilité avérée. Il peut être employé dans de nombreuses configurations d'ouvrage. Son coût représente un investissement important, qui se justifie néanmoins par ses bons résultats.

13. Utilisé seul ou comme traitement confortatif d'une saignée drainante.

SEL-A

Ce procédé peut être utilisé pour des traitements linéaires¹³, surfaciques ou généralisés (ce dernier cas est celui de la Fiche chantier du tunnel de Rive-de-Gier).

Ce type de procédé est particulièrement bien adapté aux tunnels revêtus en béton coffré. La surface d'application doit être régulière (en terme de planéité et de rugosité) ; dans le cas contraire, une reprise de la surface est nécessaire pour obtenir une bonne planéité (exigence de planéité P2 selon FD P18-503 et $PMT \leq 1,5$ mm selon la NF EN 13036-1).

Le SEL-A s'emploie sur un support en bon état et préparé, avec un aspect de surface non ruisselant, ce qui constitue une réelle difficulté dans certains cas.

Ce procédé intradossé adhérent est récent en ouvrages souterrains mais dispose de références nettement plus anciennes sur d'autres types d'ouvrages (résine utilisée par exemple en cuvelage de bâtiment depuis plus de 50 ans). Il présente un retour d'expérience très satisfaisant à ce jour, assurant une efficacité avérée et une bonne durabilité.

Il est aisément réparable car apparent.

Son utilisation en tunnels routiers longs (+ 300 m) nécessite des précautions particulières vis-à-vis du risque incendie. Il est obligatoire d'ajouter une protection rapportée (enduit ou plaque ancrée) pour atteindre le classement M0 en voûte et M1 en piédroit, conformément à la Note d'Information n°25 du CETU.



Illustration 14 : Tunnel de Rive-de-Gier – Application du tissu de fibres de verre d'un SEL-A

SEPC

Ce procédé peut être utilisé pour des réparations surfaciques ou généralisées, ou pour le traitement de points singuliers en combinaison avec une étanchéité par DEG-S.

Ce type de procédé est particulièrement bien adapté pour les revêtements en béton projeté. Il peut également être utilisé sur un revêtement coffré. Son épaisseur sera plus importante que celle d'un SEL-A mais, dans les tunnels de plus de 300 m, le dimensionnement de la coque de confinement peut permettre de répondre aux exigences de tenue au feu.

Comme le SEL-A, le SEPC s'emploie sur un support en bon état et préparé, avec un aspect de surface non ruisselant. Il s'accommode aisément d'une géométrie chahutée à l'échelle décimétrique ou métrique, mais il est préférable d'avoir une texture de surface de faible rugosité pour éviter la surconsommation de produit. À titre indicatif, en ouvrage neuf, il est conseillé de limiter la granularité du béton support à 8 mm (se reporter aux fiches techniques des fournisseurs).

Le temps de polymérisation du produit d'étanchéité projeté est très variable selon les conditions de température et d'hygrométrie présentes en phase travaux. La condensation semble nuire à la polymérisation du produit et faire varier sa dureté Shore A. La non-obtention de la dureté Shore A empêche le recouvrement par le béton projeté afin de ne pas dégrader le produit d'étanchéité. Cette contrainte peut être pénalisante dans le cadre d'un chantier avec un calendrier serré.

Un point de vigilance concerne l'adhérence entre le support, le produit d'étanchéité et le béton projeté de protection. Outre le risque d'obtenir sur chantier une adhérence sensiblement plus faible que les données fournisseurs, le recul sur ce produit n'est pas suffisamment pour faire l'hypothèse que l'adhérence se maintient dans le temps. Cela impose que le béton projeté pour la protection et le confinement du SEPC soit, soit autoportant, soit ancré dans le support. Chaque ancrage constitue un point singulier qui doit être traité. Si leur nombre est important, la probabilité de fuite est non négligeable. Il est donc recommandé d'opter pour une coque de confinement autoportante (se reporter aux recommandations du GT6 de l'AFTES relatives à la prescription des bétons projetés par voie mouillée pour une application définitive en ouvrage souterrain, à paraître).



Illustration 15 : Tunnel du col de Rousset – Projection robotisée d'un SEPC

3.9.3 Collecte des eaux drainées

Les traitements d'étanchéité et de drainage doivent être associés à un dispositif d'évacuation des eaux drainées dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- dimensionnement large, notamment en cas d'eau incrustante (diamètre minimum des drains de 150 mm pour permettre leur entretien) ;
- réflexion amont sur la nécessité de prévoir des dispositifs visitables et nettoyables ;
- prise en compte du risque de gel, en tenant compte des retours d'expérience de l'exploitant lorsque des systèmes sont déjà en place dans l'ouvrage.

Certains ouvrages sont déjà équipés de drains ou caniveaux de collecte des eaux, dans ce cas, il faut s'assurer du déversement des nouvelles eaux collectées dans l'existant mais aussi s'assurer que le dimensionnement de l'existant est suffisant et si ce n'est pas le cas, inclure des travaux d'agrandissement de l'existant. À titre d'exemple, les travaux d'étanchement dans le tunnel des Échelles ont réutilisé les caniveaux existants qui avaient été initialement mis en place pour collecter les eaux de zones traitées par coque drainante en 1993. Le retour d'expérience de l'exploitant a permis d'estimer que leur dimension était suffisante pour pouvoir absorber des quantités d'eau plus importante liées à l'étanchement de nouveaux travaux en 2013. On peut également noter que ce retour d'expérience a également permis d'éviter des travaux d'isolation thermique alors que les caniveaux existants étaient relativement superficiels par rapport au risque de gel. En effet, l'exploitant a pu indiquer que l'eau ne gelait pas à l'intérieur des caniveaux (fort débit).

Lorsqu'il n'existe pas de dispositifs de collecte des eaux, il est nécessaire d'en créer. Pour cela, deux philosophies sont possibles :

- soit on conçoit un système basé sur des principes et méthodes très proches de ceux utilisés en tunnels neufs (cf. par exemple la Fiche chantier du col de Menée et schéma de principe ci-après) : pose de caniveaux (cunettes) préfabriqué(e)s ou mise en œuvre d'un drain, entouré d'une « chaussette » en géotextile pour éviter l'intrusion de fines, au sein d'une tranchée remplie de matériaux drainants ; adjonction de protection thermique, etc. ;
- soit, lorsque l'ouvrage est peu ou pas traversé par des piétons, il est possible d'utiliser un dispositif spécifique sensiblement moins coûteux : les « caniveaux-graviers » (cf. Fiche chantier du Grand Tunnel, sur la RD 926).

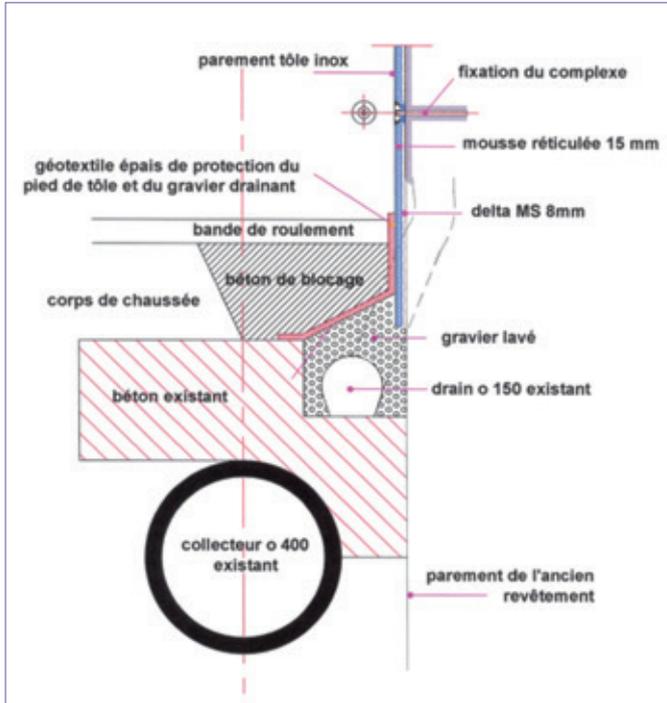


Illustration 16 : Exemple de drainage en base de piédroit dans le tunnel de Marquaires dans une zone de parement drainant (noter l'absence de trottoir dans cette zone, particularité liée à l'exiguïté du tunnel existant)

Mis en place sur les zones courantes du Grand Tunnel (sans revêtement coffré), les « caniveaux-graviers » permettent de recueillir l'eau quel que soit son point d'arrivée en base de piédroit. Les graviers utilisés sont des graviers roulés et lavés de granulométrie 10/30 (sans fines). Les eaux collectées dans les caniveaux sont renvoyées dans des regards en extrémité de tunnel ou vers le collecteur général en tunnel. L'entretien des caniveaux-graviers est quasi inexistant (enlèvement des gros débris) sauf en cas de colmatage ; dans ce cas, on retire simplement les graviers et on les remplace.

Le paragraphe suivant présente sous forme graphique l'ensemble des solutions courantes pour le traitement des venues d'eau.

Sa présentation préfigure les étapes que nous recommandons de suivre pour sélectionner la ou les solutions adaptées à un ouvrage donné.

Le premier schéma conduit à la sélection d'une famille de traitements. Le second rentre dans le détail des dispositifs de drainage et des procédés d'étanchement correspondant à chaque famille et liste les problématiques majeures à prendre en compte dans la réflexion sur le projet de réparation d'un ouvrage.

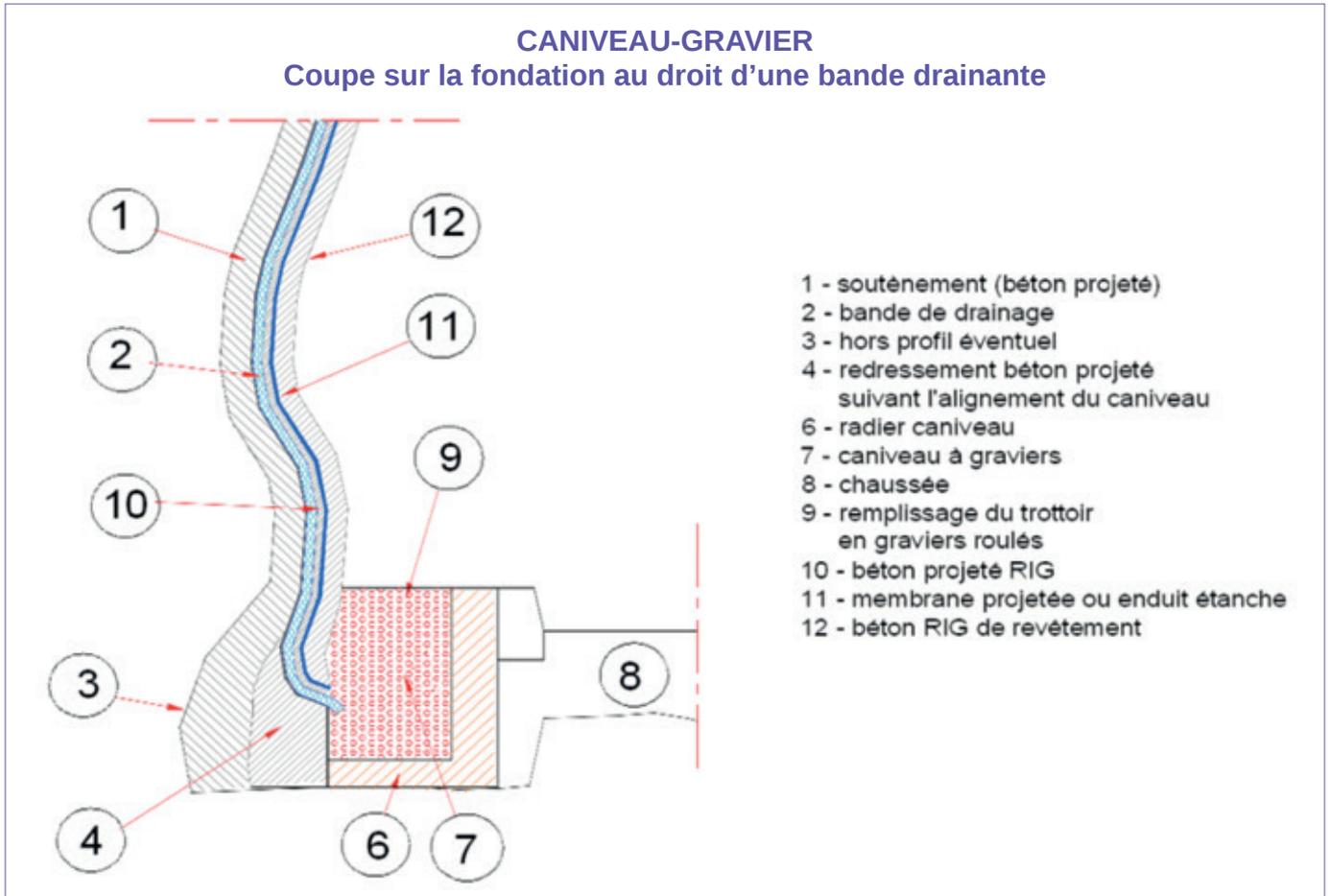
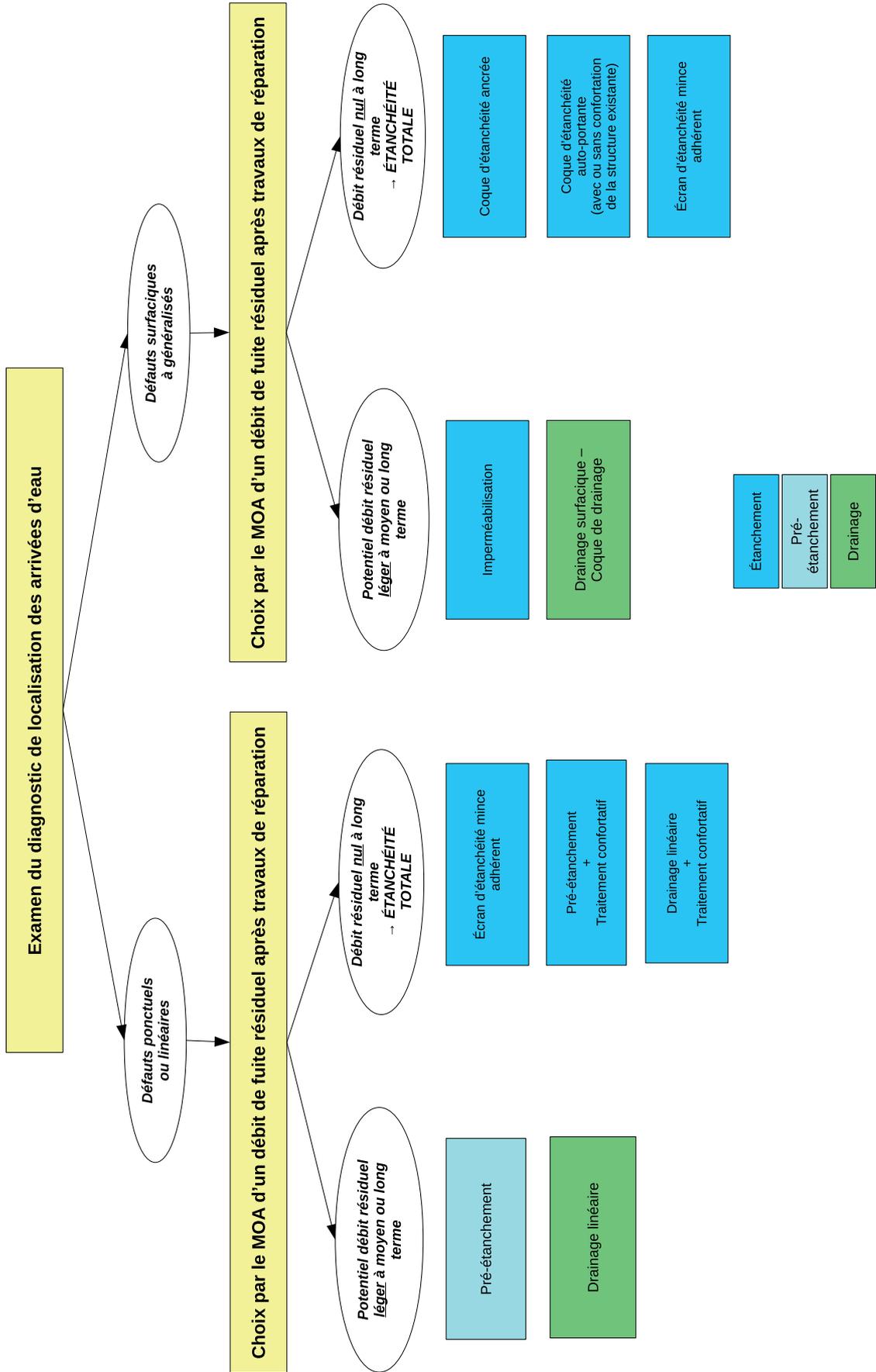


Illustration 17 : Exemple de coupe transversale d'un caniveau à graviers

SYNOPTIQUE D'AIDE AU CHOIX DES PROCÉDÉS D'ÉTANCHEMENT
OU DES DISPOSITIFS DE DRAINAGE EN TUNNELS ROUTIERS



Le présent paragraphe ne traite que du traitement des venues d'eau, mais un projet de réparation traitera bien sûr de l'ensemble des dégradations existantes et, plus largement, de l'ensemble des exigences du maître d'ouvrage. C'est pour cela que les paragraphes 4 et 5 suivants complètent celui-ci en traitant respectivement de la rectification de la géométrie et du renforcement des tunnels.

Pour aider au choix d'une méthode de traitement des venues d'eau, nous proposons de suivre deux étapes : d'abord, définir un ensemble de procédés d'étanchéité ou de dispositifs de drainages utilisables et ensuite, après avoir fixé les critères de choix, trouver le procédé ou dispositif le plus adapté au sein de cet ensemble, constituant une présélection de méthodes.

3.11.1 Présélection des méthodes de réparation possibles

Sont proposés ci-après les principaux points techniques à prendre en compte, au stade de l'avant-projet, pour présélectionner les différentes solutions de réparation possibles.

La stratégie de traitement des venues d'eau dépend tout d'abord de la localisation de ces arrivées d'eau. Le diagnostic de l'ouvrage doit préciser la nature des zones d'arrivées d'eau (joint de bétonnage, fissures, etc.) et leur densité. Ainsi, il est souvent conseillé de privilégier une réparation généralisée (et donc, apportant un niveau d'étanchéité uniforme sur l'ouvrage) dès que les venues d'eau sont diffuses et réparties sur l'ensemble de l'ouvrage. Il est à noter également que les techniques de réparations localisées fonctionnant par blocage de l'eau provoquent souvent le déplacement des émergences.

Le deuxième aspect influençant fortement le choix des méthodes est lié aux objectifs du maître d'ouvrage en termes de « débit de fuite résiduel ». Ce choix a de fortes répercussions sur les possibilités techniques disponibles et, bien sûr, sur le coût des travaux, en particulier le coût initial, qui ne doit pas être le seul coût pris en compte. En effet, le choix le plus pertinent tient compte de la notion de coût global, intégrant les coûts de maintenance et la durée de vie prévisible de la réparation. Noter qu'un projet de réparation peut prendre en compte des objectifs différents suivant les parties d'ouvrages concernées : par exemple, étanchéité totale en voûte et étanchéité relative en piédroits (cf. § 3.6 Terminologie).

Pour beaucoup de procédés d'étanchements, un élément primordial pour leur bonne efficacité repose sur les débits d'eau pendant la réparation et sur la possibilité, ou non, de réaliser un arrêt d'eau provisoire ou un drainage permettant de travailler à l'abri de l'eau. Ceci est impératif pour pouvoir utiliser les traitements intrados adhérents. Il est donc nécessaire, pour ces méthodes, d'être en mesure de capter ou stopper provisoirement

les venues d'eau (calfeutrement des fissures, drains de décharge, enduits d'imperméabilisation et/ou injections, etc.). Dans la mesure du possible, la réalisation des travaux est fortement recommandée pendant une période de faible pluviométrie...

Conformément aux recommandations du GT9 de l'AFTES [GT9R1F3, 2016], il est conseillé, en tunnels routiers, de privilégier une étanchéité totale en cas de risque de formation de stalactites, de verglas ou de dépôt de calcite sur la chaussée ; une étanchéité relative peut être envisagée pour les tunnels peu fréquentés ou peu soumis au gel.

Toutes les étapes préalables à la réparation sont détaillées dans les recommandations de l'AFTES. On insiste tout particulièrement sur la nécessité des analyses d'eau pour prendre en compte :

- son caractère incrustant mesuré selon l'indice de Riznar, intervenant dans le dimensionnement du réseau de drainage et l'accessibilité à ce dernier pour son entretien ;
- son agressivité, intervenant dans la définition de la classe d'exposition des bétons ou dans la durabilité des dispositifs métalliques vis-à-vis de la corrosion.

Il est également nécessaire de s'assurer de la stabilité de l'ouvrage. Si elle est mauvaise ou douteuse à long terme, certains procédés d'étanchement permettent d'apporter un confortement structural (voir les logigrammes ci-dessus). Il faudra néanmoins s'assurer de pouvoir continuer à suivre l'évolution structurelle de l'ancien ouvrage, et pour cela prévoir des dispositifs permettant de le visiter (trappes ou autres).

Les exigences de maintien du gabarit après réparation ont souvent un fort impact sur le choix des méthodes de réparation envisageables. Pour aider à la prise en compte de cette contrainte, l'encombrement des procédés présentant un impact significatif sur le gabarit est donc également indiqué dans le logigramme ci-dessus, qui permet ainsi de prendre en compte les spécificités des tunnels routiers pour présélectionner les solutions de traitement possibles

Dans ce logigramme, les procédés d'étanchement et les dispositifs de drainage ayant fait l'objet du retour d'expérience CETU apparaissent doublement soulignés.

En résumé, les **critères de présélection** des méthodes de réparation possibles sont les suivants :

- exigences du maître d'ouvrage et de l'exploitant en termes de débit de fuite résiduel (choix entre un étanchement total ou relatif) ;
- localisation des arrivées d'eau (choix entre un étanchement complet ou partiel) ;
- besoin concomitant de confortement structural (certaines méthodes de traitement des venues d'eau en apportent naturellement un, d'autres nécessitent des travaux complémentaires – cf. § 5 Travaux préalables au traitement des venues d'eau) ;

- adaptation par rapport à l'exigence de gabarit et à l'espace disponible ;
- adaptation par rapport au type de support (rocher, maçonnerie, béton...) ;
- adaptation à la géométrie de l'ouvrage existant (courbes) ;
- respect des exigences de comportement au feu, sans être toutefois soumis strictement aux exigences imposées aux tunnels neufs (cf. *Note d'information n°25* du CETU) ;
- prise en compte des risques liés au gel-dégel ;
- uniquement pour des ouvrages ne recevant qu'un étanchement partiel, prise en compte du risque, à moyen ou long terme, que les reports d'arrivée d'eau nécessitent de réparer d'autres zones de l'ouvrage. Cela concerne plus particulièrement les injections ou les dispositifs de drainage qui viendraient à se colmater en cas d'eau incrustante.

3.11.2 Critères de choix et pondération

Sont proposés ci-après les principaux critères à prendre en compte, au stade du projet, pour faire la sélection du dispositif ou du procédé à retenir parmi la présélection définie ci-avant.

Le concepteur retiendra, parmi cette liste de critères, ceux qui sont les plus pertinents pour son projet de réparation.

Pour faire ressortir la meilleure solution possible, il est intéressant de confronter les points de vue du concepteur, du maître d'ouvrage et de l'exploitant pour pondérer ces critères. Par exemple, des coefficients variant de 1 à 4 peuvent être définis (1= importance faible, jusqu'à 4 = importance très forte).

Ces **critères de sélection** s'ajoutent aux critères de présélection et sont regroupés ci-dessous en fonction des éléments suivants :

- contraintes d'exécution :
 - adéquation vis-à-vis des conditions d'exploitation pendant les travaux (fermeture totale permanente, fermeture totale de nuit, exploitation sous alternat, etc.),
 - adéquation entre les contraintes de la méthode et la zone d'installation de chantier disponible,
 - délai d'exécution en fonction de la cadence de mise en œuvre,
 - adaptation par rapport aux éventuelles irrégularités géométriques du support existant (hors profil),
- facilité de mise en œuvre¹⁴ (en fonction du type de support, son état, sa géométrie, le niveau d'arrivée d'eau),
- facilité/possibilité de fixation d'équipements (lourds ou légers) en préservant le niveau d'étanchéité,
- adéquation par rapport à la situation du chantier (isolement, livraison difficile),
- possibilité de phasage des travaux (soit par choix préalable, soit en cas de dérive du planning),
- possibilité d'insertion d'équipements ;
- contraintes économiques :
 - coût immédiat,
 - coût global, incluant la durée de vie attendue du procédé et les coûts d'exploitation (par exemple en cas de persistance d'un débit de fuite admissible ou en cas d'exigence de nettoyage),
 - possibilité de spécifier dans le marché une garantie particulière couvrant les travaux d'arrêt d'eau ;
- exigences de gestion patrimoniale (possibilité de surveillance, entretien et inspection, pérennité de la solution) :
 - possibilité/facilité d'inspection de l'ouvrage après réparation,
 - exigences d'entretien de la solution de réparation,
 - acceptabilité d'un risque de détérioration et aptitude à la réparation en cas de détérioration,
 - résistance aux chocs de véhicules,
 - références et fiabilité prévisible à long terme (procédé ayant fait l'objet d'un retour d'expérience, procédé sous Avis Techniques CETU ou Évaluation AFTES, etc.),
 - confort pour l'utilisateur, esthétique de la solution.

Pour chacun de ces critères, il est proposé d'affecter à chaque solution présélectionnée une note variant entre - 2 et + 2.

À l'issue de cette analyse comparative, le procédé servant de solution de base est choisi, les pièces du marché sont finalisées et l'appel d'offres lancé.

Nota bene : en fonction du mode de passation retenu pour le marché (approche performantielle ou prescriptive avec possibilité de variantes), les listes des critères de présélection et de sélection proposées ci-dessus peuvent être reprises dans le règlement de consultation pour indiquer aux entreprises les critères de jugement des offres.

Dans tous les cas, au moment de l'analyse des offres, un critère important est à ajouter : celui du niveau de spécialisation de l'entreprise.

14. Pour les procédés de mise en œuvre délicate, pensez à exiger les qualifications appropriées des entreprises.

MODIFICATION DU PROFIL EN TRAVERS

Une modification du profil en travers de l'ouvrage est souvent nécessaire pour permettre le traitement des venues d'eau car de nombreuses méthodes d'étanchement ou de drainage engagent la section libre de l'ouvrage (par exemple un chemisage en béton ou une coque indépendante).

Une rectification de la géométrie peut également être nécessaire pour améliorer les caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage :

- hauteur libre, en cohérence avec celles de l'itinéraire concerné ;
- largeur roulable,
- visibilité en virage ;

Les éléments ci-dessous couvrent ces différents cas de figure.

La modification du profil en travers d'un ouvrage présente des difficultés particulières liées au maintien de la stabilité de l'existant. Elle peut être réalisée **soit par alésage de l'intrados, soit par décaissement de la chaussée**. Ces deux façons de procéder peuvent être associées, ou non, en fonction des contraintes liées à l'environnement de l'ouvrage et aux conditions d'exploitation pendant les travaux.

4.1 ÉLÉMENTS DE CHOIX DE MÉTHODES

Le décaissement de chaussée est une technique plus simple, plus rapide et moins coûteuse qu'un alésage de la section transversale.

La première étape du choix de méthodes consiste donc à étudier la faisabilité d'un décaissement. Si celle-ci n'est pas assurée, on recourra à l'alésage ; ce sera également le cas pour des reprises ponctuelles de la géométrie.

Les éléments à prendre en compte les suivants :

- impact sur le profil en long :
 - raccordement de la chaussée en amont et en aval du tunnel,
 - présence d'ouvrages impossibles à abaisser (par exemple un ovoïde de grande section sous l'ouvrage).

Ces deux points peuvent rendre le décaissement impossible ou limiter sa profondeur ;

- possibilité de conserver le tracé en plan (souvent pour des problèmes de visibilité en courbe) et la largeur existante entre piédroits (si la réponse est non, un alésage sera, au moins partiellement, nécessaire) ;
- présence d'un revêtement existant (sauf cas particulier, on évite de démolir un revêtement existant) ;
- risque de déstabilisation de l'ouvrage en raison de la profondeur des fondations existantes ;
- état de l'intrados (si un confortement est nécessaire, on ne pourra pas se contenter d'un décaissement) ;
- présence d'équipements en voûte, en particulier si leur fonctionnement doit être maintenu pendant les travaux ;
- intérêt de conserver les réseaux existants sous trottoirs ou chaussée (assainissement, passage de câbles, réseaux incendie, etc.) ;
- nécessité de maintenir partiellement la circulation sous chantier (le décaissement peut être réalisé par $\frac{1}{2}$ chaussée avec circulation sur la $\frac{1}{2}$ chaussée adjacente, ce qui n'est pas possible dans le cas d'un alésage).

4.2 MOYENS D'EXÉCUTION

Les moyens d'exécution envisageables sont les suivants :

- machine à attaque ponctuelle ;
- explosif.

Le choix entre ces deux techniques se fait selon les principaux critères suivants :

- type de tunnel (revêtu ou non) ;
- type de revêtement ;
- paramètres géotechniques (résistance de la roche, état de fracturation du massif...) ;

- hydrogéologie du massif ;
- environnement de l'ouvrage (bâti, falaise, etc.) ;
- volume à excaver ;
- conditions d'exploitation pendant les travaux.

L'explosif est *a priori* bien adapté aux ouvrages non revêtus et aux volumes à aléser importants ; le brise-roche est souvent privilégié pour les petits volumes. Ces règles n'étant pas strictes, le maître d'œuvre choisit la méthode qui lui paraît la plus pertinente, tout en laissant la possibilité aux entreprises, sauf contraintes particulières, de proposer une variante d'exécution.

Quelle que soit la technique retenue, il est souvent nécessaire de fixer un **seuil de vibration** autorisé, pour des raisons liées à l'environnement de l'ouvrage ou en cas de craintes vis-à-vis de la stabilité de l'excavation existante.

Le lecteur pourra consulter à ce sujet les documents suivants :

- Recommandations du GT16 de l'AFTES relatives à la « Prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains » [GT16R2F1, 2018];
- Dossier-pilote Environnement du CETU.

4.2.1 Machines à attaque ponctuelle

Ces machines automotrices sur pneus ou chenilles sont équipées de bras orientables à l'extrémité desquels est placé l'outil d'attaque (godet excavateur, brise-roche, tête de havage).

En travaux de réparation, ces machines mobiles existent sous deux formes : les **fraiseuses** ou les **brises-roches hydrauliques (BRH)**. Ces types d'engins possèdent une large gamme de modèles, avec des puissances, des performances et des encombrements différents, à choisir en fonction des contraintes de chantier. Leur domaine d'utilisation privilégiée concerne l'excavation des roches de résistance moyenne ($R_c < 60$ MPa) et/ou fracturées ($RQD < 35$ %).

Les **fraiseuses** sont une adaptation directe des haveuses à pics de l'industrie minière où un bras articulé muni à son extrémité d'une tête rotative équipée de pics vient « gratter » et abattre le rocher.

Elles sont utilisables dans les tunnels au rocher (en dehors des zones boulonnées), revêtus en béton NON armé ou en maçonneries. Elles ne résistent pas à la présence d'éléments métalliques (armatures, boulons, treillis soudé, etc). Il existe également des fraiseuses « plates » plutôt réservées aux faibles épaisseurs à excaver.



Illustration 18 : Tunnel du Rond-Point – Démolition du revêtement à la fraiseuse



Illustration 19 : Vue détaillée d'une fraiseuse

Les BRH agissent à la manière d'un marteau-piqueur de grande taille en se connectant à l'extrémité du bras articulé d'une pelleteuse. Il existe également des BRV, brises-roches à frappes variables qui permettent d'adapter automatiquement l'énergie par coup et la fréquence de frappe à la dureté du terrain (fournisseur spécifique).



Illustration 20 : Tunnel des Échelles – Alésage au BRH et vue détaillée d'un BRH

Cette méthode, par attaque ponctuelle, a pour principaux avantages son adaptation facile aux variations de section, la limitation des hors-profils et la diminution des ébranlements dans le massif encaissant. Elle a cependant une limite économique en fonction de la dureté et de l'abrasivité des roches.

4.2.2 Explosifs

L'emploi d'explosifs pour la rectification de la géométrie est généralement privilégié dans les roches dures et/ou peu fracturées. Pour cela, on utilise des **explosifs « brisants »** (vitesse de détonation > 4 000 m/s) dont l'effet sur la roche est triple :

- l'énergie de choc fissure le terrain encaissant ;
- l'énergie engendrée par le dégagement d'un important volume de gaz à haute température et pression ouvre ces fissures et disloque le matériau ;
- le surplus de cette énergie expulse les blocs disloqués.

La rectification à l'explosif d'un tunnel existant est réalisée suivant les mêmes principes que le creusement d'un tunnel neuf. Chaque cycle de travail comprend les phases de foration, chargement, tirs, ventilation, purge puis marirage (évacuation des matériaux).

En site urbain, pour les riverains du chantier, les nuisances sonores et les projections de blocs ne concernent que les premiers décimètres de tunnel. Par contre, les vibrations transmises au terrain peuvent engendrer des désordres sur les habitations voisines, à plusieurs centaines de mètres.



Illustration 21 : Effet d'un tir à l'explosif en tête de tunnel

Les documents de référence pour l'emploi des explosifs sont :

- pour les aspects réglementaires : un article de synthèse sur la réglementation pour les explosifs destinés à un usage civil (cf. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE – Autres documents) ;
- pour les contraintes environnementales : le dossier pilote des tunnels n°5 : « Environnement » de juillet 2011 ;
- pour les aspects techniques : *Les recommandations de l'AFTES* (GT3R4F2, GT3R6F1 et celles du GT3R2F2) ;
- le cas échéant, les prescriptions particulières locales (site urbain, installation classée).

4.3 DÉCAISSEMENT DE CHAUSSÉE

Lorsqu'on prévoit un décaissement de chaussée, en sus des vérifications concernant l'existence et la nature des réseaux enterrés, il faut s'assurer :

- de la constitution de la chaussée ;
- de la profondeur des fondations de la voûte dans les ouvrages revêtus ;
- de la présence éventuelle d'un radier et sa nature ;
- des caractéristiques du terrain sous-jacent.

Il est donc nécessaire d'effectuer préalablement des reconnaissances par carottages pour quantifier tous ces éléments. Même s'ils sont mentionnés dans le dossier d'ouvrage, ils doivent être systématiquement vérifiés *in situ*.

Si le projet prévoit un décaissement plus profond que la base des fondations du revêtement, des études approfondies doivent être conduites pour vérifier la faisabilité de la solution (risque de poussée de l'encaissant sur la fondation qui n'est plus bloquée latéralement, risque d'affouillement localisé sous la fondation).

Avant de débiter les travaux de décaissement, on rappelle également qu'il est nécessaire de vérifier l'état du revêtement existant ou la stabilité de l'excavation rocheuse, en prenant en compte les vibrations induites par les travaux.

Les différentes phases d'un décaissement de chaussée sont :

- la démolition de la chaussée bitumineuse existante par « ripage » ou rabotage ;
- la démolition des trottoirs et de l'assainissement éventuel ;
- le déroctage du radier béton et/ou de l'encaissant rocheux ;
- le tri et l'évacuation des matériaux vers des décharges spécialisées en fonction de leur nature.



Illustration 22 : Tunnel des Monts – Décaissement de la chaussée avant chemisage

Les déblais peuvent être exécutés à l'explosif (en particulier en cas de roche extrêmement dure) ou mécaniquement. Cette dernière méthode est privilégiée dans la mesure du possible car elle autorise un décaissement par demi-chaussée permettant de conserver une voie de circulation pendant les travaux.

Si le décaissement est plus profond que la fondation et que la qualité du terrain est insuffisante, le renforcement de la partie située au-droit de la fondation est réalisé à l'avancement (par injection, boulonnage, palplanches, parois béton...). Les travaux peuvent également être effectués par « plots alternés » pour limiter les risques d'instabilités (cf. Fiche chantier 09 du tunnel de Marquaires).



Illustration 23 : Tunnel de Fort L'Écluse – Décaissement important par 1/2 chaussée

4.4 ALÉSAGE DE L'INTRADOS

4.4.1 Généralités

Les alésages de l'intrados peuvent concerner l'ensemble de la section transversale ou être au contraire ponctuels, notamment localisés aux angles du gabarit.



Illustration 24 : Tunnel de Cap Roux – Alésage au BRH localisé à l'angle du gabarit



Illustration 25 : Tunnel de la RD 926 – Alésage important de la section transversale

Dans les deux cas, on rappelle qu'il peut être nécessaire de mettre préalablement en sécurité l'excavation existante (aux têtes et/ou en dehors des zones à alésage).

Dans les tunnels non revêtus, le projet doit intégrer la mise en œuvre d'un soutènement adapté après alésage. Il peut aller d'une simple « peau protectrice » en béton projeté [AFTES, GT20] jusqu'à un soutènement plus lourd en béton projeté associé à des cintres ou boulons (se reporter au paragraphe 5.2. Travaux de soutènement pour les tunnels non revêtus). Le soutènement est souvent réalisé à l'avancement pour limiter la partie non soutenue pendant l'exécution de l'alésage.

De plus, même si l'ouvrage était initialement sec, il est nécessaire de prendre en compte le risque de nouvelles venues d'eau, créé par l'augmentation de la section de l'ouvrage (« effet de drain »). Pour cette raison, le profil en travers dérocté doit intégrer la possibilité de mettre en œuvre un procédé d'étanchéité adapté (se reporter au paragraphe 3 Traitement des venues d'eau). Cette surexcavation (limitée entre 10 et 30 cm suivant le procédé prévu) ne complexifie pas le projet et n'entraîne pas un surcoût important. *A contrario*, sans cet espace réservé, le traitement *a posteriori* des venues d'eau nécessiterait un nouvel alésage... après enlèvement des soutènements et des éventuels équipements qui auraient été mis en place ! Il est donc recommandé de mettre systématiquement en œuvre une étanchéité.

D'un point de vue économique, il est préférable d'effectuer la totalité des travaux en une seule intervention. En cas de contraintes budgétaires fortes, un phasage peut être étudié (incluant la problématique des équipements), l'important est que la réalisation de la surexcavation soient prévue et réalisée en temps utile.

La géologie du terrain à alésage étant visible, les paramètres des plans de tir peuvent être optimisés plus facilement que dans le cas du creusement d'un tunnel neuf. Les exigences vis-à-vis du respect géométrique du profil final peuvent donc être plus fortes.

Dans les zones de boulonnage existant, il faut substituer un nouveau boulonnage à l'ancien. Pour cela, deux cas sont possibles :

- avec une machine à attaque ponctuelle, l'alésage est tout d'abord réalisé entre et autour des boulons ;
- à l'explosif, les écrous et plaques de répartition sont enlevés, puis le tir effectué.

Dans les deux cas, les nouveaux boulons sont ensuite mis en place et les anciens récupérés.

4.4.2 Cas des entrées en souterrain

De manière générale, au voisinage des têtes, les contraintes liées aux vibrations et risques de chutes de blocs sont plus importantes et doivent prendre en compte le milieu environnant (riverains, protection des voies et habitations en contrebas, etc.).

Préalablement aux travaux, il faut s'assurer de la stabilité des falaises et talus dans l'environnement proche des têtes du tunnel (boulonnage, béton projeté, mise en place de filets, etc.). Ces études et travaux sont réalisés par des bureaux d'études et des entreprises spécialisées et doivent faire l'objet d'un marché spécifique.

Pour des **alésages importants**, les entrées en souterrain nécessitent une étude spécifique. On peut être amené à établir un nouveau front d'attaque et à réaliser une nouvelle tête, avec des techniques de travaux neufs.



Illustration 26 : Tunnel de Rouaine – Sécurisation préalable des têtes

Pour illustration, on pourra se référer à la fiche de cas 11 du Grand tunnel de la RD926. Les photos ci-dessous présentent la tête amont du Grand tunnel où les travaux ont consisté à :

- démolir l'ancienne tête pour établir un nouveau front d'attaque ;
- mettre en place une voûte parapluie en tube pétroliers ;
- aléser la nouvelle section de l'ouvrage à l'abri d'un soutènement en cintres HEB et blindage acier.



Illustration 27 : Tête amont avant travaux



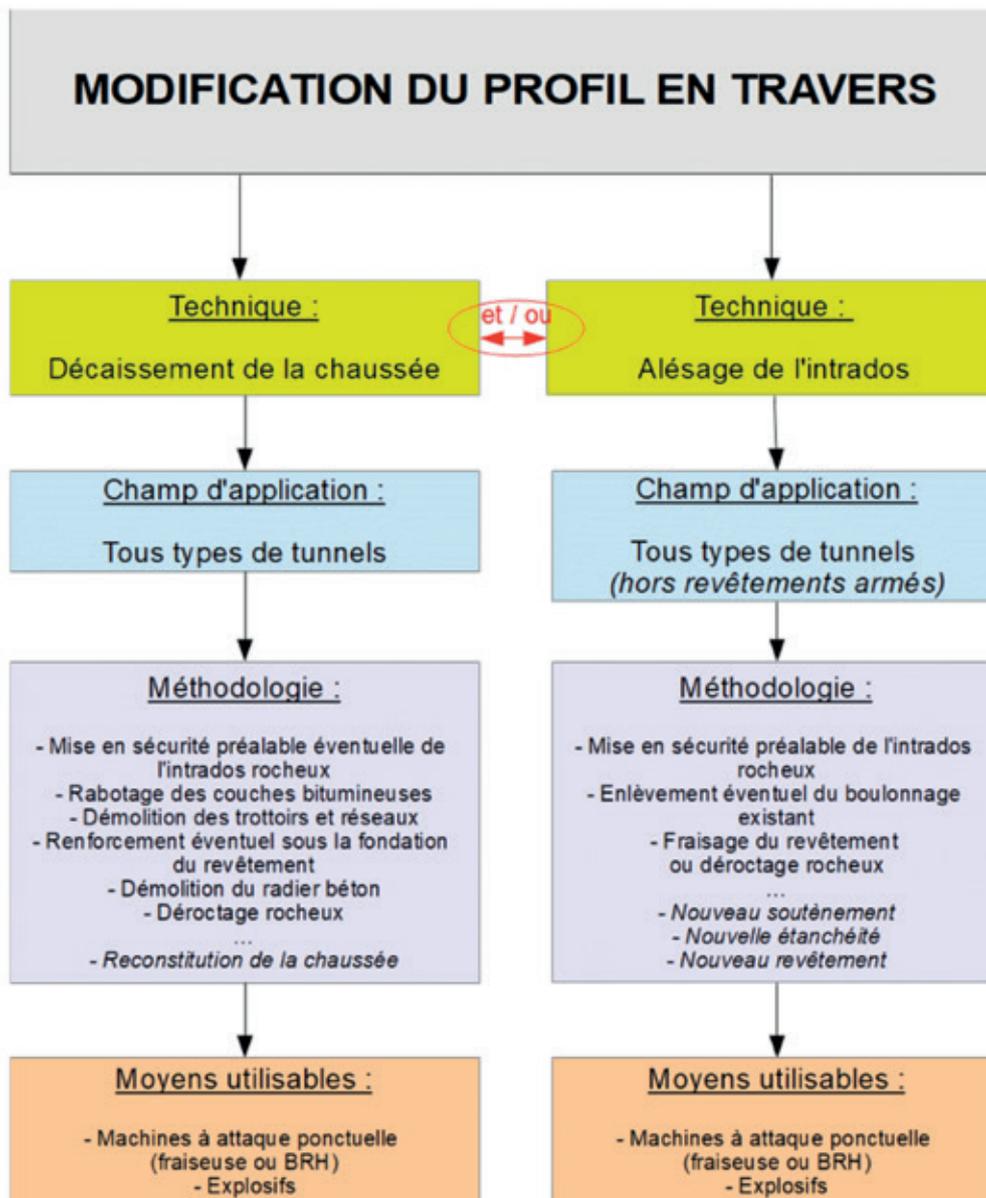
Illustration 28 : Mise en place des tubes pétroliers sur le nouveau front



Illustration 29 : Nouvelle section alésée cintrée



Illustration 30 : Tête amont après travaux



TRAVAUX PRÉALABLES DE STABILISATION DE L'OUVRAGE

Toute intervention de réparation d'un tunnel existant doit être précédée d'études ou de travaux préalables visant à s'assurer de la stabilité à court et long terme de l'ouvrage.

Ces travaux préalables peuvent être différents selon que le tunnel est revêtu ou non, et selon le type de revêtement.

Dans tous les cas il faut s'assurer qu'il n'y a pas de risque à court terme pour la sécurité des entreprises. Cela se traduit généralement par une opération de purge.

5.1 PURGE

La purge consiste à éliminer les blocs instables à l'aide d'une pince (terme consacré en travaux souterrains pour désigner une barre à mine) ou d'un matériel pneumatique léger.

Elle peut être nécessaire sur toute ou partie de l'intrados de l'ouvrage, revêtu ou non, et parfois même au-delà des

zones de travaux ou sur les têtes. Cette opération doit impérativement être exécutée par un personnel spécialisé et réalisée avec discernement afin de ne pas déstabiliser l'excavation ou le revêtement.

5.2 TRAVAUX DE SOUTÈNEMENT POUR LES TUNNELS NON REVÊTUS

Dans un tunnel au rocher, des travaux de soutènement préalables à une opération de réparation peuvent être nécessaires, soit dans un objectif immédiat : pour assurer la sécurité des ouvriers pendant certaines phases des travaux (par exemple avant un alésage), soit pour assurer une stabilisation à long terme de l'excavation (par exemple avant mise en place d'une coque indépendante qui empêchera la surveillance de la roche après travaux).

Ce soutènement fait appel aux mêmes techniques que celles utilisées lors de la construction d'un ouvrage neuf ; elles ne sont donc pas développées dans le présent document. Le lecteur peut se reporter aux nombreuses recommandations qui ont été publiées à ce sujet :

- Recommandations du GT 6 de l'AFTES sur le soutènement immédiat : TOS n°31 ;
- Recommandations du GT 6 de l'AFTES sur le boulonnage : TES n°241 ;
- Recommandations du GT 23 de l'AFTES sur les cintres : TOS n°156, TOS n°27 ;
- Recommandations du GT 20 de l'AFTES sur le béton projeté : TOS n°164 ;
- Recommandations du GT 14 sur les injections : TOS n°146 ;
- Recommandations du GT 30 de l'AFTES, Conception et guide de dimensionnement du boulonnage radial en tunnel : GT30R1F1 (guide paru en novembre 2020) ;
- Recommandations du GT8 de l'AFTES sur la conception et la réalisation des travaux d'injections des sols et des roches : TOS n° 194-195 ;
- Recommandations de l'ASQUAPRO sur le béton projeté.

Une spécificité parfois rencontrée pour les travaux de réparation est l'utilisation de boulons à ancrage ponctuel. En effet, ils présentent l'avantage d'être mis en œuvre rapidement pour une protection immédiate (soutènement d'urgence) tout en pouvant être démontés et récupérés s'ils ont été placés dans l'attente de travaux pour lesquels leur présence gênerait (par exemple, des travaux d'alésage).

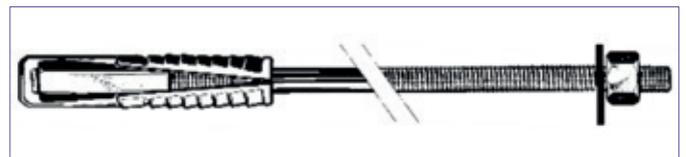


Illustration 31 : Boulon à ancrage ponctuel

Ce type de boulon comporte un dispositif mécanique d'expansion à son extrémité qui, en s'ouvrant par vissage, s'écarte contre les parois du forage pour s'ancrer en fond de trou, dans la roche intacte. La qualité de l'ancrage dépend donc de la bonne résistance locale du terrain (minimum $R_c > 10$ MPa et à éviter en cas de risque de fluage de la roche au voisinage de l'ancrage du boulon). On privilégie ces boulons pour les massifs rocheux. Ils ont usuellement un diamètre de 16 à 20 mm et une longueur comprise entre 1,5 et 3 m.

Certains boulons à ancrage ponctuel peuvent être injectés lorsqu'ils sont positionnés pour un usage définitif. On parle alors de boulons mixtes. Cette possibilité permet de maintenir très rapidement un élément rocheux instable (soutènement immédiat pour la sécurité) et de renforcer et pérenniser l'ancrage à plus long terme.

5.3 TRAVAUX PRÉALABLES POUR LES TUNNELS EN MAÇONNERIE

Les tunnels en maçonnerie sont généralement très anciens et très spécifiques. Un livre entier de plus de 150 pages, intitulé « Évaluation structurale et conception de réparations des ouvrages d'art en maçonnerie¹⁵ » vient d'être consacré à ce sujet par l'AFGC. Quatre recommandations publiées sous l'égide du STRRES, à savoir les guides FABEM 6 (parties 1 à 4) rassemblent près de 1000 pages sur le renforcement et la réparation des maçonneries. Le lecteur est invité à se reporter à ces documents très détaillés.

Ne sont donnés ci-dessous que les éléments à avoir en tête pour traiter des venues d'eau en tunnels maçonnés sans risquer de mettre en péril la structure ou les personnels intervenants dans l'ouvrage.

5.3.1 Bref rappel sur les maçonneries

Une maçonnerie est constituée par un assemblage de blocs (pierres de taille, moellons ou briques). L'assemblage de ces blocs est assuré par un mortier à l'exception des maçonneries de pierres sèches où la tenue des éléments se fait par contact direct et par frottements entre éléments. En tunnels, on trouve des maçonneries à joints plus ou moins larges mais pas de pierres sèches.

Dans une maçonnerie courante, on distingue le mortier de hourdage et le joint :

- le mortier de hourdage sert à assurer la liaison entre les différentes pierres et moellons constituant la maçonnerie. Ce mortier doit bien remplir l'espace jusqu'au terrain et avoir une résistance mécanique suffisante pour transmettre les efforts appliqués sur l'ensemble de la structure ;
- le joint se rencontre en parement. Il remplit l'espace entre les pierres de parement et masque le mortier de hourdage dont il constitue la protection vis-à-vis des agressions extérieures. Son rôle principal est d'assurer l'étanchéité de la maçonnerie ainsi que la continuité de la résistance du parement. Il a également un rôle esthétique.

Il est important de savoir que les meilleurs moellons sont en parement et que c'est le premier rang de moellons qui assure la stabilité de l'ensemble. Il ne faut donc pas raisonner en prenant en compte l'épaisseur totale de maçonnerie donnée dans les documents d'archives, mais il faut aussi rechercher l'épaisseur du premier lit, en particulier s'il est nécessaire de procéder à une purge¹⁶ ou un alésage.

15. Paru en 2021.

16. Dans le cas du tunnel-canal de Condes où la profondeur d'exfoliation s'approchait localement de l'épaisseur du premier lit de moellons, des précautions ont été prises dans le marché en limitant à 2kg le poids des matériels autorisés pour la purge et en attirant l'attention de l'entreprise sur les risques encourus.

17. Cf. rubrique « Brève du GT9 » de la revue *Tunnels et Espace Souterrain* n°282.

Il faut également avoir en tête que, si les méthodes de réalisation des tunnels en maçonnerie ont évolué au fil des années, toutes ont en commun la présence de boisages et de surcreusement locaux, plus ou moins importants, et donc de fréquents manques de contact entre la maçonnerie et l'encaissant. Pour cela, de nombreux tunnels maçonnés ont dû faire l'objet d'injections de collage ou de régénération. Les documents d'archives, aussi bien à l'époque du creusement qu'ultérieurement, sont toujours très importants (à rechercher et à consulter préalablement aux travaux).

Enfin, les précautions à prendre pour le maintien de la stabilité de la voûte pendant les réparations se traduisent bien souvent par des travaux en plots alternés (cf. Illustration 32 ci-dessous). On parle de « pianotage ».



Illustration 32 : Reconstitution de maçonnerie par plots alternés

5.3.2 Drainage

Les ouvrages en maçonnerie sont toujours drainés afin d'évacuer les eaux du terrain. Dans les zones de tête, des chapes d'étanchement extradossées en mortier de chaux ou asphalté ont été mises en œuvre, lorsque les conditions le permettaient, afin d'éviter le lessivage des mortiers.

Selon la nature de la maçonnerie, il faut être extrêmement attentif au besoin de respiration des pierres ou briques car certaines peuvent se dégrader fortement si elles sont en permanence imbibées d'eau¹⁷. Une maçonnerie est conçue avec des mortiers de hourdage et des joints plus poreux que les éléments qu'ils assemblent afin de protéger ces derniers contre l'humidité.

Tous les drains existants doivent être conservés ou remplacés par un autre système permettant d'évacuer les eaux d'infiltration.

5.3.3 Travaux de sécurisation

Des travaux de sécurisation peuvent être nécessaires pour assurer la stabilité de l'ouvrage pendant les travaux d'étanchement. Ces travaux peuvent être de différentes natures :

- rejointoiement et reconstitution locale de maçonneries ;
- injection de régénération ;
- protection ou renforcement par béton projeté ;
- épinglage ;
- mise sur cintres.

Ces techniques ne sont pas décrites dans le présent guide car explicitées dans les documents cités ci-dessus.

Nota bene : la mise sur cintres peut être provisoire ou définitive. Dans le 1^{er} cas, il faudra être attentif aux conditions d'enlèvement ultérieur de ces cintres. Dans le second, il faut prendre en compte l'impact sur la géométrie de l'ouvrage (cf. Illustration 33).



Illustration 33 : Tunnel de Tende – Mise sur cintres définitifs

5.4 TRAVAUX PRÉALABLES POUR LES TUNNELS EN BÉTON COFFRÉ

Depuis le début des années 80, un dispositif d'étanchéité par géomembrane synthétique (DEG-S) a été systématiquement mis en œuvre à la construction des tunnels routiers en béton. Les tunnels plus anciens ne sont pas étanchés et doivent souvent faire l'objet de traitements des venues d'eau (cf § 3).

En complément à ces traitements, il est souvent nécessaire de réparer des désordres liés aux venues d'eau elles-mêmes ou à des causes concomitantes. Il s'agit généralement d'interventions localisées. Les désordres structurels qui peuvent être liés à des mouvements du terrain (failles, glissement de versant) ne sont pas traités dans le présent document.

Les tunnels en béton sont généralement constitués de béton non armé, mais certaines zones sont armées, soit pour reprendre les sollicitations du terrain encaissant, notamment dans les zones de têtes, soit, localement, au droit des batteries

d'accélérateurs et des anneaux de désincarcération. On trouve également des armatures à la jonction du radier et des piédroits (banquette de fondation) sur des hauteurs variables.

Une partie des désordres récurrents est lié à la présence d'armatures.

5.4.1 Ragréages et reprise d'armatures corrodées

La corrosion des armatures est assez fréquente en tunnels, comme dans de nombreux ouvrages, soit à cause d'un enrobage insuffisant à la construction, soit à cause d'une carbonatation du béton (dans le cas de béton très ancien ou de mauvaise qualité). La réparation doit être réalisée dans les règles de l'art pour éviter la chute des ragréages (cf. Illustration 34).



Illustration 34 : Tunnel de Rive-de-Gier - Ragréage non adhérent sur armature corrodée (avant et après purge)

Les ragréages sont classiquement utilisés pour traiter :

- les défauts de jonction entre plots de bétonnage ;
- les bullages importants ou nids de cailloux lorsque le parement est destiné à être peint ;
- les nids de cailloux situés dans des zones armées (risques de corrosion des armatures) ;
- les écailles de béton dues à la corrosion d'armatures ou à des chocs de véhicules.

Dans les deux premiers cas, la préoccupation est d'ordre esthétique et mieux vaut éviter d'intervenir si la situation est acceptable. Dans les deux derniers cas, la pérennité des aciers ou la sécurité des usagers (risque de chute d'écailles) sont menacées.

Les ragréages doivent être réalisés en respectant scrupuleusement les procédés (matériaux et mise en œuvre) préconisés dans la norme NF P95 103, tout particulièrement dans les zones au-dessus des parties circulées. La préparation des zones à traiter est cruciale.

On peut se reporter aux documents généraux sur les ouvrages d'art (*Cahier pratiques du Moniteur 5600 : réparation du béton, FABEM 1 : reprise des bétons dégradés*) et aux normes NF P95-101 à 103. Ces dernières présentent les étapes de la démarche et les différentes solutions possibles qui dépendent de nombreux facteurs, dont :

- l'origine du désordre : épaufrure, défaut d'enrobage (ponctuel ou généralisé) ou défaut de matériaux, carbonatation, pénétration de chlorures, présence d'eau (en provenance de l'intérieur du tunnel ou du terrain encaissant), etc. ;
- la criticité des armatures concernées (en fonction de leur localisation, leur étendue, leur rôle structurel, etc.) ;
- l'environnement dans lequel elles se situent (zone de salage ou non, zones de têtes ou zone centrale d'un ouvrage long, etc.).

L'inspection détaillée de l'ouvrage, grâce au relevé et à la caractérisation des désordres, permet d'aboutir à un pré-diagnostic qui constitue une première étape identifiant les causes probables et les conséquences prévisibles des désordres observés. À ce stade, il peut être nécessaire d'élaborer un programme d'investigations complémentaires.

L'étape suivante a pour but de confirmer les causes, l'étendue des désordres et leurs conséquences, et d'établir les préconisations adaptées. Pour cela, il peut être nécessaire de mettre en œuvre le programme d'investigations complémentaires (si préconisées à l'issue de l'inspection) ou de réaliser des recalculs de l'ouvrage pour déterminer la section minimale d'acier nécessaire.

Il est recommandé d'établir sans attendre un projet de réparation. En effet, toute action temporaire avant travaux nécessiterait, pour être efficace, de détourner les aciers, or les exigences liées à une telle opération, dans le respect des prescriptions de la

norme de référence NF P95-101, sont telles qu'il est préférable de réaliser directement la réparation complète.

Les seuls cas où il est possible de différer la réparation sont ceux pour lesquels la corrosion est liée à un défaut situé dans une zone où la réduction de la section des armatures n'est pas critique et l'environnement est peu agressif. Les contrôles annuels des parties concernées peuvent alors permettre de suivre l'évolution (ou la stabilisation) du phénomène et de programmer la décision de réparation au moment opportun.

Nota bene : pour obtenir une bonne pérennité des travaux de réparation, le détournement des aciers devra toujours être exécuté avec beaucoup de soin et sur une zone suffisamment large allant au-delà de la zone corrodée.

5.4.2 Injections structurelles

Ce type d'injection est à distinguer des injections d'arrêt d'eau. Elles peuvent être utiles, dans des cas relativement rares, en complément au traitement des venues d'eau.

Dans le béton non armé des tunnels, la présence de fissures largement ouvertes (quelques millimètres) dues au phénomène de retrait est courante, ne constitue pas un « désordre¹⁸ » et ne nécessite pas de traitement particulier.

Par contre, les défauts de bétonnage liés à un remplissage incomplet du coffrage (exemple récurrent des corbeaux de ventilation) et à un manque ou une absence d'injection de clavage en clé de voûte, au moment de la construction, ont plusieurs conséquences fâcheuses :

- ils affaiblissent la voûte et peuvent, à terme, mettre en cause sa stabilité si l'épaisseur du revêtement en clé est vraiment trop faible ;
- même s'ils sont peu importants et sans conséquence structurelle, ils rendent inefficace le compartimentage mis en place dans les tunnels étanchés par DEG-S¹⁹ et donc le traitement des venues d'eau par injections d'arrêt d'eau au moyen des pipettes prévues à cette effet pendant la construction de l'ouvrage.

Ces désordres peuvent être détectés par auscultation sonore au marteau²⁰ de la voûte, à condition que l'épaisseur minimale du revêtement soit de l'ordre de, ou inférieure à 10 cm. Dans les autres cas, des méthodes d'auscultation plus performante sont nécessaires et ces défauts peuvent rester non détectés lorsqu'ils n'ont pas de conséquences structurelles.

L'injection de coulis de ciment ou mortier est généralement la méthode la plus adaptée pour reconstituer l'effet de voûte, renforcer le revêtement et redonner son efficacité au compartimentage de l'étanchéité. Si nécessaire, un coffrage provisoire est mis en place pendant les phases d'injection et de durcissement des matériaux.

18. Ce type de fissures n'est noté sur les levés d'inspection que pour en connaître l'historique et les distinguer d'éventuelles fissures structurelles provenant de mouvements du terrain encaissant.

19. Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane Synthétiques.

20. D'autres méthodes de détection existent (par exemple par impédance mécanique ou géoradar). Se reporter à l'annexe 7 du livre 1 du *Guide de l'inspection* du CETU ou aux recommandations du GT 14 de l'AFTES *Diagnostic structurel des ouvrages souterrains visitables* (2021).

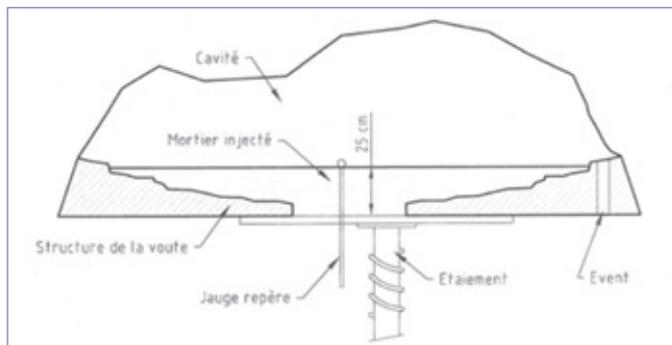


Illustration 35 : Schéma de principe d'une injection de clavage en voûte



Illustration 36 : Tunnel du Col de Menée – Injection de clavage

5.5 TRAVAUX PRÉALABLES POUR LES TUNNELS EN BÉTON PROJÉTÉ

Il s'agit essentiellement de reprises ponctuelles liées à des désordres dont l'origine est le plus souvent des sous-épaisseurs de béton projeté combinées à la présence d'eau dans des terrains argilo-gonflants et à l'utilisation de bétons projetés non renforcés (treillis ou fibres). Ces désordres se manifestent par des chutes de béton projeté, de taille variable.

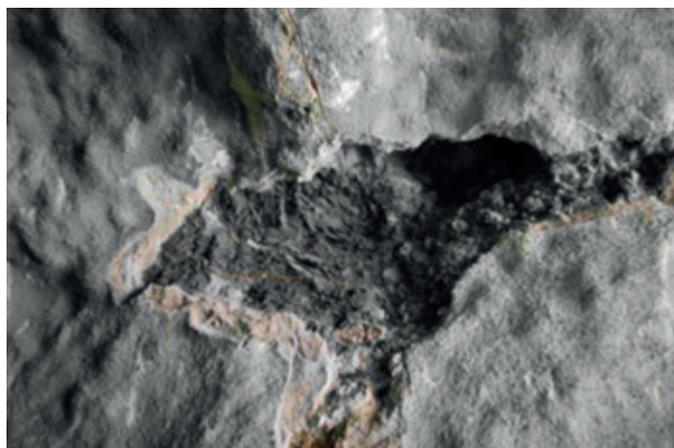
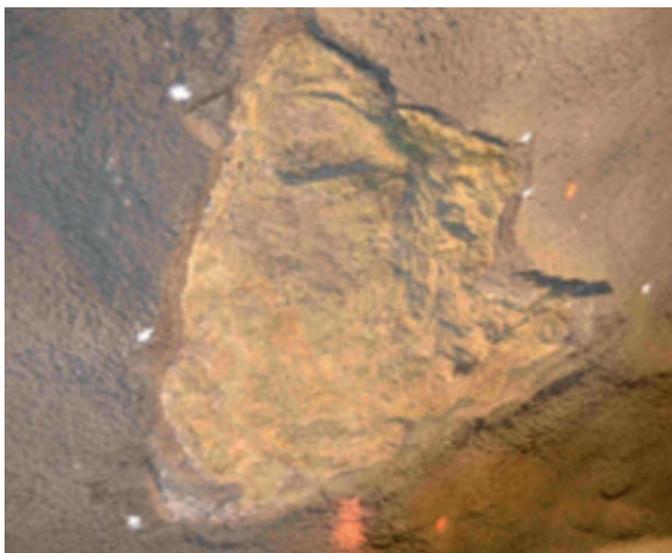


Illustration 37 : Chutes de béton projeté – En haut : intertube du tunnel du Lioran ; en bas : tunnel de Boulc (26)

La problématique la plus délicate est de définir la nécessité, ou non, de faire des forages d'appel pour évacuer l'eau et éviter sa diffusion ou sa mise en charge à l'arrière du revêtement. Le phénomène redouté est l'augmentation des débits du fait de la création de drains. Un des critères de décision est la nature des terrains traversés et leur sensibilité à l'eau : on cherche à l'évacuer en amont des zones sensibles. En cas de réalisation de ces forages, la collecte et l'évacuation des eaux doivent être intégrées au projet de réparation.

La réparation se fait par purge des zones détériorées, renforcement du terrain par boulonnage si nécessaire (cf. Illustration 38), puis projection d'un béton renforcé par treillis soudé ou fibres (suivant la nature des terrains à soutenir). Le treillis soudé offre la possibilité d'un ancrage dans le terrain par le biais des boulons préalablement mis en place et complétés par des connecteurs (densité à prévoir entre 4 et 8 fixations par m²).

En sus de la réparation localisée, il peut être nécessaire de reconstituer un anneau porteur homogène sur la totalité de l'intrados, capable d'assurer un effet « voûte » si le revêtement est fortement sollicité par la convergence du terrain encaissant (par opposition à une simple peau protectrice). On se reportera dans ce cas aux recommandations du GT6 de l'AFTES relatives à la prescription des bétons projetés par voie mouillée pour une application définitive en ouvrage souterrain.



Illustration 38 : Tunnel de Boulc – Boulonnage après purge profonde (même zone que l'illustration 37)

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Les documents de référence portant sur la thématique du présent document sont listés ci-dessous.

Textes réglementaires (tunnels routiers uniquement)

Instruction du Gouvernement du 29 avril 2014 fixant les modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion

Instructions techniques annexées à cette instruction :

- Instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le RRN, version du 20 novembre 2019
- Instruction technique relative au système de management de la qualité dans les services routiers, version du 28 février 2017

Code de Commande Publique, Livre IV, deuxième partie

Cahiers des Clauses Techniques Générales (CCTG Travaux) :

- Fascicule 65 – Exécution des ouvrages de génie-civil en béton armé ou précontraint
- Fascicule 67 titre III – Étanchéité des ouvrages souterrains
- Fascicule 69 – Travaux en souterrain

Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA), avril 2010

Circulaire ministérielle en date du 16 février 2011 relative à la publication de l'ITSEOA et ses modalités d'application

Guide d'application de l'ITSEOA, **Fascicule 40** : Tunnels, Génie civil et équipements, octobre 2012

Les documents techniques du CETU (téléchargeables sur le site Internet du CETU)

Guide de l'inspection du génie civil des tunnels creusés, livres 1 et 2, janvier 2015

Guide d'application du Fascicule 69 du CCTG Travaux, mars 2019

Dossier-pilote des tunnels n°5 : Environnement, juillet 2011

Note d'information n°15, Procédé d'étanchement et de revêtement de tunnels par coque en béton projeté indépendante, décembre 2006

Note d'information n°18, Prise en compte des véhicules hors gabarit aux abords des tunnels routiers, avril 2020

Note d'information n°25, Les exigences de comportement au feu des procédés de traitement des venues d'eau, février 2014

Fascicule 67 titre III – Version commentée, mars 2019

Aide à la rédaction de CCTP – Bétons projetés par voie mouillée pour les soutènements de tunnels, document conjoint CETU-ASQUAPRO, 2017, en cours de mise à jour

Les recommandations de l'AFTES

[GT9R1F3, 2016] Recommandations du GT 9 sur « Les traitements d'arrêt d'eau dans les ouvrages souterrains », TES n°257

[GT9R10F1, 2000] Recommandations du GT 9 sur « L'étanchéité et le drainage des ouvrages souterrains », TOS n°159

[GT3R5F1, 2000] Recommandations du GT 3 sur « Les explosifs à l'usage des mines, travaux publics et carrières, commercialisés en France », TOS n°161

[GT6, 2021] Recommandations du GT 6 sur « Les bétons projetés par voie mouillée pour une application définitive en ouvrage souterrain, Principes et aide à la prescription », à paraître en 2022

[GT16R2F1, 2018] Recommandations du GT16 relatives à la « Prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains »

[GT3R4F2, 1999], Recommandations du GT 3 sur « La mise en œuvre du tir séquentiel en travaux souterrains », TES n°210

[GT3R6F1, 2011], Recommandations du GT 3 sur « L'utilisation des explosifs : émulsions, sensibilisées et pompées directement à front de taille », TES n°223

[GT3R2F2, 1993], Recommandations du GT 3 sur « L'utilisation du guide pour la mesure et le suivi de l'effet des vibrations induites par les travaux », TES n°210

[GT6R2F1, 1979] Recommandations du GT 6 sur « La méthode de construction des tunnels avec soutènement immédiat », TOS n°31, Numéro Spécial 82

[GT6R4F1, 2014], Recommandations du GT 6 sur la « Technologie du Boulonnage », TES n°241

[GT23R1F1, 1999] Recommandations du GT 23 sur le « Calcul, fabrication et mise en œuvre des cintres réticulés », TOS n°156,

[GT7R3F2, 1978], Recommandation du GT7 sur l'« Emploi des cintres dans la construction des ouvrages souterrains », TOS n°27

[GT20R1F1, 2001], Recommandation du GT 20 sur la « Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains », TOS n°164

[GT14R5F1, 1998] Recommandations du GT 14 sur « L'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables », TOS n°146

[GT30R1F1, 2020] Recommandations du GT 30 sur la « Conception et guide de dimensionnement du boulonnage radial en tunnel », guide paru en novembre 2020

[GT8R2F1, 2006] Recommandations du GT8 sur « La conception et la réalisation des travaux d'injections des sols et des roches », TOS n°194-195

Autres documents

Fascicules techniques de l'ASQUAPRO sur le béton projeté, téléchargeables sur : <http://www.asquapro.com>

Guides FABEM du STRRES, téléchargeables sur : <http://www.strres.org/>

Guide pratique de l'OPPBTP sur l'emploi des explosifs

Cahier pratiques « Réparation du béton » du Moniteur n°5600 du 25 mars 2011

J-F. Dartigue-Peyrou, *Réglementation pour les explosifs destinés à un usage civil, Toujours plus simple quand on explique...*, Tunnels et espace souterrain, n°270, Octobre-novembre-décembre 2019, pp. 28-36

OPPBTP, Travaux à l'explosif, CPT – Généralités, Collection PRATIQUES MÉTIER, <https://content.preventionbtp.fr/documentations/qCn7iiPzWMBFVoZM3kjxxm/download>

OPPBTP, Travaux à l'explosif, CPT – Option 1 travaux souterrains, Collection PRATIQUES MÉTIER, <https://content.preventionbtp.fr/documentations/HnCLENgNpFqRNvzpnhgoxX/download>

ANNEXE 1 : AIDE À LA RÉDACTION D'UN PROGRAMME FONCTIONNEL DE RÉPARATION DE TUNNEL ROUTIER

Un document support pour l'établissement du programme fonctionnel est proposé ici. Il est basé sur la recommandation T 1-94 proposée par le groupe permanent d'étude des marchés de travaux et de maîtrise d'œuvre (GPEM / TMO), publié en 1998 par la commission centrale des marchés, à l'attention des maîtres d'ouvrage.

Nature des exigences	Sujet	Attentes
I – Exigences imposées par la réglementation spécifique aux tunnels²¹		
I. A – Réglementation française	Circulaire 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 m	<p>Pour la partie technique, l'instruction technique – toujours en vigueur pour les travaux neufs – annexée à la circulaire 2000-63 (remplacée par la 2006-20), ne s'applique pas <i>stricto sensu</i> aux ouvrages en service. Elle sert toutefois de référentiel lors de travaux d'amélioration de la sécurité des tunnels existants (mise en place d'issues de secours, de niches de sécurité, de niches et réseaux incendies, résistance au feu de la structure, réaction au feu des matériaux utilisés, caniveaux à fentes, regards siphoides, ...).</p> <p>Pour la partie « administrative » : passage en comité d'évaluation (CNESOR), instruction du Plan d'Intervention et de Sécurité (PIS), etc., voir les guides CETU sur la méthodologie des dossiers de sécurité.</p>
I. B – Réglementation européenne	Directive européenne 2004-54-CE du 29 avril 2004 relative à la sécurité des tunnels du réseau routier trans-européen de plus de 500 m, transposée dans l'article 10 de loi 2006-10 du 5 janvier 2006	<p>Pour le génie civil, les dispositions sont globalement les mêmes que celles de la réglementation française, à l'exception de l'inter-distance entre niches de sécurité.</p> <p>La liste des tunnels français concernés par cette directive est téléchargeable sur le site Internet du CETU.</p>
II – Exigences traduisant les attentes des usagers vis-à-vis du projet		
II. A – Exigences fondamentales d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> – Conditions actuelles et limites d'utilisation – Conditions d'utilisation après travaux 	<p>Recensement des différentes catégories d'usagers : résidents, livreurs (économie locale), TMD, cyclistes, piétons, services de secours (pompiers, ambulances), déneigement, etc.</p> <p>Le but est d'analyser les dispositions spécifiques par rapport aux usagers. Par exemple : l'utilisation du tunnel par des transports locaux peut rendre difficile son interdiction aux P.L. de plus de 3.5 T, mais un compromis peut être le passage à certaines heures.</p> <p>Quel niveau de service offre l'ouvrage dans son état actuel ? Observe-t-on des congestions ? Faut-il envisager d'améliorer le niveau de service ?</p> <p>La rénovation de l'ouvrage peut également induire de nouveaux types de circulation qu'il faut appréhender a priori. Par exemple : le passage de cyclistes (s'ils sont autorisés) du fait d'un meilleur éclairage ; des transports locaux à la suite d'un alésage de l'ouvrage.</p>
II. B – Exigences de sécurité	Conditions de sécurité liées à l'usage	<p>Outre la réglementation spécifique à la sécurité dans les tunnels routiers, il s'agit ici, par exemple, de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la cohabitation des différents types de trafic (piétons, 2 roues, VL, PL, transports en commun) ; • les conditions d'accès à des terrains privés ; • l'accès non sécurisé au-dessus des têtes.
II. C – Exigences de confort	<ul style="list-style-type: none"> – Exigences de confort physique (par rapport au bruit, à la pollution de l'air dans l'ouvrage) – Exigences de confort psychologique (inquiétudes, stress...) 	<p>Cela peut concerner par exemple la mise en place d'un éclairage ou son renforcement sur les trottoirs dans un tunnel urbain ou encore l'habillage des piédroits.</p> <p>Le « confort psychologique » peut être apporté par la mise en place d'une signalisation adaptée permettant une information quant aux conditions de circulation.</p>

21. Se reporter à la note d'information du CETU n°21 de décembre 2011.

Nature des exigences	Sujet	Attentes
II. D – Exigences en échange des modifications prévues	Aménagements particuliers de l'ouvrage et de ses abords pouvant constituer une contrepartie pour les tiers	Mesures compensatoires à prévoir, mise en valeur des intérêts locaux. Il peut s'agir par exemple du maintien des écoulements d'eau existants, du rétablissement d'un chemin piétonnier, de la mise en œuvre de murs antibruit, etc.
III – Exigences aux abords de l'ouvrage		
III. A – Exigences d'intégration dans le site	Parti architectural, dispositions paysagères	Les travaux sur l'ouvrage doivent en conserver le caractère. Il faut vérifier si le tunnel, et notamment les têtes, ne se situent pas dans le périmètre de protection d'un monument historique. Dans l'affirmative il y aura lieu de consulter l'architecte des bâtiments de France. À noter que cette procédure peut demander 5 mois. Dans la négative il faudra tout de même se poser la question de l'intégration dans le site. À l'extrême : la question peut se poser de savoir si le tunnel peut être remplacé par une tranchée à l'air libre ?
III. B – Exigences d'adaptation à l'existant	– Adaptation aux ouvrages ou bâtiments existants – Prise en compte des ouvrages à construire	Ce sujet aborde les contraintes techniques de compatibilité des travaux avec les ouvrages existants. Exemple : tunnel adossé à un paravalanche ou creusement d'une galerie de sécurité à proximité d'un tunnel existant. L'aspect sécurité doit être examiné pour les ouvrages ou habitations proches. Cet aspect doit définir les mesures à retenir : protection, consolidation ?
III. C – Exigences de circulation hors tunnel	Circulation aux abords et accès à l'ouvrage	À l'issue des travaux, la réparation prévue aura-t-elle une incidence sur les accès (exemple : suppression de trottoirs ; cheminement au-dessus du tunnel) ? Le tunnel se situant sur un itinéraire, il convient d'élargir la réflexion en aval et en amont de l'ouvrage afin d'être en cohérence (continuité d'une piste cyclable).
III. D – Exigences de sécurité	Sécurité des riverains et des abords	L'exemple peut être l'existence d'une coulée d'avalanche à l'une des têtes du tunnel impliquant de réaliser une « casquette » en extrémité du tube. Ce peut être également une falaise présentant des risques de chutes de blocs qu'il faudra purger et sécuriser. Autre exemple : modification d'un virage d'entrée/sortie.
III. E – Exigences de respect de l'environnement	– Confort des riverains – Limitation des nuisances en utilisation normale et en période d'entretien de l'ouvrage	Lors d'une réparation, réfléchir également : <ul style="list-style-type: none"> • aux améliorations possibles du confort des riverains (protections acoustiques aux entrées en zone habitée ?) ; • au positionnement d'une éventuelle nouvelle usine de ventilation ; • au traitement des eaux de lavage (entretien) ou de ruissellement de la chaussée.
IV – Exigences du maître d'ouvrage et de l'exploitant		
IV. A – Exigences de destination	Confortation de l'ouvrage	Faut-il améliorer la stabilité de l'ouvrage ? Le diagnostic doit permettre de répondre à cette question. La difficulté d'une réponse peut conduire à proposer au MOA ou au MOE un programme d'investigations complémentaires et ciblées. Certaines configurations géologiques en tunnels non revêtus peuvent conduire à maintenir une accessibilité pour les inspections de l'ouvrage après travaux.
	Étanchement de l'ouvrage	Faut-il améliorer l'étanchéité de l'ouvrage ? Dans l'affirmative, il faudra préciser le type des venues d'eau en différenciant les venues d'eau ponctuelles des venues d'eau réparties et en indiquant leur importance. Bien préciser l'objectif après travaux : étanchéité totale (zéro goutte), ou imperméabilisation (à terme, débit d'eau résiduel admissible) ?
	Assainissement de l'ouvrage	Faut-il améliorer l'assainissement existant ? En créer un ? Ce sujet doit être traité en relation avec la circulaire sur la sécurité et notamment vis-à-vis de l'exigence de la mise en place d'un caniveau à fente et de regards siphoniques.
	Évolution de la destination de l'ouvrage, à court, moyen et long terme	Ouverture ou restriction de circulation (TMD ? convois exceptionnels ? piétons ? ...) Modification du tonnage ou du gabarit autorisé, en tenant compte des ouvrages amont et aval ? Création d'une voie verte ? Le maître de l'ouvrage indique les prévisions d'évolution. L'ouvrage s'inscrit-il dans un programme d'aménagement plus étendu ? L'intervention est-elle envisagée pour du long terme ou est-elle limitée dans le temps (intervention sécuritaire par exemple), un itinéraire de substitution devant être réalisé ? La réflexion est la même pour les équipements.

Nature des exigences	Sujet	Attentes
	Géométrie de l'ouvrage	Ce sujet regroupe plusieurs questions : <ul style="list-style-type: none"> • quelle largeur roulable ? Le calcul de la visibilité doit être vérifié en fonction de la vitesse retenue ; • quelle hauteur libre minimale, en fonction du statut de la voie ? ; • quel gabarit est autorisé (au regard de la signalisation en place) ? ; • les équipements doivent-ils être modifiés ? Si oui, quelles incidences sur le profil en travers ? <p>En cas de doutes, il pourra être opportun de réaliser des relevés topographiques complémentaires.</p>
	Exigence économique	Quelles sont les contraintes budgétaires ?
	Phasage des interventions	Le MOA a-t-il prévu de phaser les interventions ? Comment ? Le phasage peut-il être effectué par tronçons ou par tranches fonctionnelles (section inférieure puis supérieure par exemple ; travaux extérieurs / travaux dans le tunnel) ?
	Exigences particulières	Il peut s'agir d'une exigence allant au-delà de la réglementation applicable, par exemple fourreaux supplémentaires pour passage ultérieur de réseaux.
IV. B – Exigences d'exploitation et d'entretien	Degré de permanence et surveillance	Description des moyens d'exploitation actuels et réflexion sur l'opportunité de les modifier. Par exemple, la gestion par un centre de surveillance est-elle existante ou envisagée ? Une réflexion parallèle doit être menée sur l'évolution des locaux techniques.
	Niveau de service attendu	Un changement de niveau est-il prévu (par exemple, mise en place d'un éclairage ou de plots de jalonnement, amélioration de la largeur de trottoirs) ?
	Recherche d'économies d'énergie	La réhabilitation peut être source de réflexions sur les économies envisageables grâce à des installations plus performantes (exemple LED ou énergie solaire pour l'éclairage) ; en cas de nécessité de refaire la chaussée, la mise en œuvre d'une chaussée claire serait-elle envisageable ?
	Principes d'entretien ²²	En fonction des conditions d'entretien et du retour d'expérience de l'exploitant, est-il nécessaire de prévoir des dispositifs de drainage visitables ? L'eau est-elle incrustante (en cas de doute, on prévoira des analyses d'eau). Les travaux envisagés engendreront-ils de nouvelles exigences d'entretien (cas des parements rapportés par exemple) ? Sur le plan des équipements, par exemple, on peut prévoir le positionnement de l'éclairage en rive ou légèrement décalé par rapport à l'axe de l'ouvrage pour pouvoir remplacer les lampes sous alternat de circulation.
	Compatibilité des aménagements avec les inspections détaillées ²³	Exemple : peut-on se permettre (ou quelles précautions doit-on prendre) si on envisage de masquer tout ou partie de la structure par des parements rapportés, des tôles parapluie ou une coque ? Penser au maintien du marquage décamétrique pendant et après le chantier (un marquage provisoire à la bombe de peinture en phase chantier est utile pour faciliter l'établissement des plans de récolement par l'entreprise).
IV. C – Exigence de durabilité	Quelle est la durée de vie recherchée ?	Peut-on se contenter d'une réparation légère, quitte à refaire des travaux régulièrement ? Veut-on une solution plus lourde mais plus pérenne ?
IV. D – Exigence de coût	– Coût d'exploitation – Coût d'entretien	Prendre en compte le coût global (= investissement + exploitation + entretien) dans l'évaluation des impacts budgétaires des travaux. Exemple : Les dispositifs visitables facilitant l'entretien d'un réseau de drainage sont onéreux à l'investissement mais suppriment le coût de remplacement (calcification). En revanche, il faut s'assurer que l'exploitant réalisera effectivement cet entretien. Au niveau des nouveaux équipements, penser à intégrer dans les critères de choix, la durée de vie des appareils, le coût de leur entretien et de leur remplacement, ainsi que leur consommation électrique.
IV. E – Solutions proposées	Ouvertures par rapport à la solution de base	Laissera-t-on la possibilité aux entreprises de proposer une ou des variantes ? Si oui, quelles contraintes intangibles imposer ? Des solutions de réparation innovantes ou expérimentales sont-elles acceptées ?

22. Se reporter au *Guide de l'entretien du génie civil des tunnels routiers* [CETU, 2021].

23. Sur le réseau routier national, la périodicité des inspections détaillées périodiques (IDP) est définie dans le Fascicule 40. Les autres maîtres d'ouvrage peuvent s'en inspirer tout en y apportant des aménagements.

Nature des exigences	Sujet	Attentes
V – Exigences concernant les conditions de réalisation des travaux		
V. A – Exigences de capacité	Limites acceptables de l'utilisation de l'ouvrage pendant les travaux : niveau de service minimal à satisfaire, limitation des cas d'indisponibilité	Il faut définir les possibilités de limitation de la circulation en fonction des périodes retenues (type de véhicules, nombre de voies) : l'ouvrage peut-il être fermé, circulé sous alternat ? À quelles périodes (de jour, de nuit) ? Quelles sont les possibilités de déviation ? Pour des interventions courtes, peut-on envisager des « micro-coupures » ?
V. B – Exigences de calendrier	<ul style="list-style-type: none"> – Délais partiels – Périodes possibles ou imposées pour les travaux pour des raisons d'exploitation ou climatiques – Délai total ou date (s) de livraison (s) et exigences de mise en service 	<ul style="list-style-type: none"> – Des délais partiels sont-ils nécessaires ? – Indication des périodes pendant lesquelles l'ouvrage peut-être en travaux : <ul style="list-style-type: none"> • quels mois de l'année ? • quels jours de la semaine ? • Interventions diurnes ou nocturnes? – Nécessité de passage permanent des véhicules de secours ? – La fin des travaux peut être conditionnée par un événement important (ouverture d'une section de voie, manifestation sportive d'envergure...) ; identifier cette exigence peut repousser le début des travaux ou, à l'inverse, imposer un nombre de postes plus élevé (prendre en compte les travaux mais aussi les vérifications nécessaires avant la remise en service).
V. C – Exigences géographiques d'exécution	Contraintes d'accès de l'entreprise à son chantier, limites des zones d'évolution ou de travail	Ces éléments peuvent être importants dans le choix de la solution. Ils concernent la circulation et le travail au sol et en hauteur (ex : solution demandant une surface de montage importante : coques préfabriquées, tunnelier, coffrage, grues de levage, etc.). Identifier les accès au chantier et les zones de stockage et d'installation possibles, adapter leurs dimensions à l'envergure du chantier et au stockage nécessaire (silo ?). Faut-il une base-vie ?
V. D – Exigences de sécurité	Sécurité, protection, conditions de vie sur le chantier	La sécurité doit être examinée en phase de chantier et aux moments de remise en circulation. Elle concerne les personnels et les usagers de la route. Exemple : éléments de protection des voies de circulation pendant les travaux, mesures adoptées à chaque fin de poste de travail (qui est en charge de la réouverture), nécessité de clôture/gardiennage (utilisation d'explosifs, risque de vols) ? Tous ces aspects seront réexaminés avec le coordonnateur de sécurité (réglementation hygiène et sécurité) et l'exploitant (habitudes locales).
V. E – Exigence vis-à-vis de l'environnement	Limitation des nuisances pour l'environnement naturel et pour les riverains	La proximité d'habitations impose-t-elle des restrictions, l'utilisation de matériels adaptés, etc. ? Se référer à la réglementation en matière de bruit, air, eau, gestion des déchets (exemples : confinement du chantier, plages horaires vis-à-vis des bruits et vibrations, risque de poussières, traitement des eaux de lavage, évacuation des déblais, élimination des déchets, etc.).
V. F – Exigence vis-à-vis des entreprises	<ul style="list-style-type: none"> – Références ou qualifications demandées – Garanties financières – Garanties particulières exigées par le maître d'ouvrage 	Commencer à penser aux exigences spécifiques à ce projet, nécessite-t-il des entreprises très spécialisées ? Quelles qualifications exiger ? Cela peut avoir une influence sur le type de marché retenu : AO ouvert ou restreint ? Les garanties particulières peuvent concerner les traitements d'étanchéité, les peintures, les protections anti-corrosion, etc. Les durées usuelles sont définies par les règles de l'art, en particulier dans les recommandations de l'AFTES. Les exigences de garanties devront être mentionnées dans le marché et apparaître dans le bordereau de prix.

ANNEXE 2 : COMPOSITION-TYPE D'UN DOSSIER D'AVANT-PROJET DE RÉPARATION

On propose ici un plan-type dont le contenu est à adapter en fonction des méthodes de réparation à mettre en œuvre.

1. CADRE DE L'ÉTUDE

- 1.1 Présentation du contexte – Objectifs de l'étude et décisions antérieures
- 1.2 Rappel du programme fonctionnel ou « exigentiel » (à annexer au dossier)
- 1.3 Plans de situation
- 1.4 Caractéristiques générales de l'itinéraire et mode d'exploitation du tunnel

Type d'infrastructure : nombre de voies, statut de l'itinéraire, gabarit autorisé dans le tunnel et sur l'itinéraire encadrant, vitesses autorisées

Trafic : volume et typologie (TMJA, % PL, TMD, CE le cas échéant)

Modalités générales d'exploitation et classe d'exploitation de l'itinéraire (par rapport au schéma directeur national), degré actuel de permanence et de surveillance du tunnel

Itinéraires alternatifs pour les TMD et/ou en cas de déviation

2. ÉTAT DE L'OUVRAGE À RÉPARER

- 2.1 Description de l'ouvrage existant

Caractéristiques géométriques (tracé en plan, profil en long, profil en travers) – Rappel de la section transversale (hauteur libre # gabarit)

Description du génie civil existant (têtes, revêtement, assainissement, chaussée...)

Description des équipements d'exploitation et de sécurité

Écarts par rapport à la réglementation sur la sécurité pour les tunnels de plus de 300 m

- 2.2 Bilan de la surveillance de l'ouvrage (IDI, IDP et faits marquants)

Analyse des désordres et évaluation de l'état de l'ouvrage (notes IQOA Génie civil et Eau)

- 2.3 Résultats des investigations complémentaires réalisées
- 2.4 Synthèse, incertitudes et risques associés

3. SOLUTION RETENUE

- 3.1 Présentation des principes de la solution de base

Justification du choix de la solution

Modalités générales d'exploitation (degré de permanence et surveillance retenu, organisation de l'exploitation) (le cas échéant)

Principaux aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers, aménagements pour l'accès des secours (le cas échéant)

Principes de ventilation, de confortement, d'étanchement, d'assainissement, etc.

Conséquences sur l'entretien et la maintenance à prévoir

- 3.2 Caractéristiques géométriques de la solution

Tracé en plan, profil en long, profil en travers

Note sur la géométrie (visibilité et gabarit)

- 3.3 Dossier géologique, hydrogéologique et géotechnique

Contexte, reconnaissances réalisées, données disponibles

Modèle géologique et géotechnique prévisionnel (caractérisation du massif rocheux, évaluation des principales difficultés techniques, incertitudes à ce stade des études)

Programme des reconnaissances complémentaires

- 3.4 Génie civil de la solution

Génie civil des têtes (ouvrages et locaux à prévoir aux têtes, hypothèses géotechniques, évaluation des difficultés techniques)

Génie civil de la section courante du tunnel (méthodes à mettre en œuvre et notes de calcul si besoin)

Génie civil de second œuvre : drainage et étanchéité, assainissement (à dimensionner), trottoirs, chaussée, raccordements sur l'existant à l'extérieur de l'ouvrage

Génie civil lié à l'exploitation et à la sécurité (ouvrages linéaires ou ponctuels de sécurité, conditions de réalisation de ces ouvrages)

- 3.5 Équipements d'exploitation et de sécurité de la solution (le cas échéant)

Ventilation et désenfumage (description, pré-dimensionnement)

Alimentation électrique (modalités de livraison, principe et schéma succinct de la distribution, principes d'alimentation secourue)

Éclairage (pré-dimensionnement du renforcement, définition des régimes)

Réseau de lutte contre l'incendie

Équipements de gestion technique centralisée (système de supervision, réseau de transport, réseau de terrain, bilan de puissance)

Équipements de gestion du trafic (description et localisation des dispositifs de fermeture, principes pour les signalisations de police, de sécurité, l'affectation des voies)

Équipements de surveillance et de détection (réseau d'appel d'urgence, vidéo-surveillance, détection automatique d'incidents, détection d'incendie)

Retransmission des radiocommunications (étude de couverture, définition des besoins de retransmission, principaux équipements nécessaires à la retransmission)

Tableau de synthèse des équipements (identifier les bilans globaux de puissance)

3.6 Contraintes et dispositions à prendre pour l'exécution des travaux

Intégration dans l'environnement (eaux et déchets à traiter pendant le chantier, toxicité et pollution de produits, lieu de mise en dépôt...)

Circulation pendant les travaux : maintien des niveaux de services, périodes...

Limitation de nuisances du chantier (poussières, bruits, vibrations, circulation des engins de chantier, distance de la centrale BPE, installation de chantier...)

3.7 Conditions de mise en concurrence, allotissement, variantes possibles

4. ESTIMATION DU COÛT DE RÉFÉRENCE ET DES DÉLAIS

4.1 Planification et phasage des travaux

Planning général prévisionnel, délais

4.2 Coût d'investissement

Hypothèses pour l'estimation financière, cadre de présentation de l'estimation

4.3 Coût d'exploitation et de maintenance

4.4 Tableau de synthèse des estimations

5. RECOMMANDATIONS POUR LA SUITE (ÉTUDES ÉVENTUELLES DE PROJET)

Définition des compléments techniques ou organisationnels à fournir (sur les conditions d'exploitation sous chantier ou des délais de réalisation)

Décomposition plus détaillée des coûts

Éventuellement, analyse plus détaillée des risques liés aux différentes phases de réalisation des travaux

6. SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Tableau récapitulatif des principales caractéristiques et enjeux majeurs

ANNEXE A – DOSSIER DE PLANS DE L'EXISTANT

Plans généraux (génie civil et équipements)

Plans de situation

Tracé en plan

Profils en long

Profils en travers

Têtes

Ouvrages annexes

Plans géologiques, hydrogéologiques et géotechniques

Cartes

Coupe géologique prévisionnelle

Plan d'implantation des reconnaissances

ANNEXE B – DOSSIER DE SURVEILLANCE DE L'OUVRAGE

Sur la base des rapports d'IDI et d'IDP génie civil et équipements

ANNEXE C – INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES RÉALISÉES

Description et résultats sur la base des rapports fournis

ANNEXE D – DOSSIER DE PLANS DE LA SOLUTION DE BASE RETENUE

Profils de confortation

Plans génie civil modifiés

Tracé en plan

Profils en long

Profils en travers

Têtes

Ouvrages annexes

Plans des nouveaux équipements (le cas échéant)

Synoptique d'implantation des principaux équipements et réseaux

Section transversale utile (avec équipements éventuels)

ANNEXE 3 : PRÉSENTATION SUCCINCTE DU PROJET ECOMINT AU TUNNEL DES ÉCHELLES (73)

Introduction

Les venues d'eau sont un problème récurrent dans les tunnels anciens non étanchés. On les rencontre également dans certains ouvrages neufs bénéficiant pourtant d'une étanchéité extradossée. Il est souvent difficile de les traiter efficacement, surtout lorsque la section disponible impose des procédés de réparation de faible épaisseur. Des injections d'arrêt d'eau peuvent facilement répondre à cette contrainte d'emprise minimale mais elles sont plutôt dédiées à des traitements locaux et leur période de garantie, même avec un traitement confortatif (ajoutant donc une certaine épaisseur), n'excède pas 3 à 5 ans (GT9, 2006). De plus, elles ne sont pas adaptées aux tunnels au rocher.

Depuis de nombreuses années, le Centre d'Études des Tunnels (CETU) est fortement investi dans la recherche de procédés pour le traitement des venues d'eau, en particulier dans le développement de solutions innovantes, durables et économiques (CETU 2006, Larive 2010, 2014).

Le contexte du projet ECOMINT

Le MEDDE, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, lance régulièrement 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 les Étanchéités par COques MINces en Tunnels : ECOMINT.

Ce projet s'inscrit dans la continuité d'une première collaboration avec le CETU, initiée lors de tests sur des films d'étanchéité et enduits d'imperméabilisation projetés. En complément à la technique de membrane adhérente, que le CETU souhaitait continuer à expérimenter, ETANDEX a proposé deux autres procédés innovants.

Après sélection du projet ECOMINT, le CETU a été chargé par le MEDDE de le suivre et de l'évaluer. La première étape a consisté à identifier un ou plusieurs sites expérimentaux adaptés.

1^{er} site expérimental : le tunnel des Échelles



Illustration 39 : Tête du tunnel en mars 2013 : de petites stalactites de glace sont encore en train de fondre...

Le CETU a travaillé à plusieurs reprises sur ce tunnel, le plus ancien tunnel des Alpes (percé de 1804 à 1813). L'ouvrage, d'une longueur de 294 m, a longtemps été situé sur le réseau routier national. Il a été transféré au Département de la Savoie en 2006.

Des travaux ont été réalisés 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 entière 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. De plus, les dépôts de calcite sur la chaussée du virage de sortie, côté Les Échelles, avaient conduit à un rainurage de la chaussée pour limiter la glissance. Cette tête est particulièrement délicate à réparer car sa géométrie est très variable.

Le Département de la Savoie, maître d'ouvrage de ce tunnel, a été très intéressé par l'emploi des techniques ECOMINT pour améliorer la sécurité des usagers et alléger les contraintes d'exploitation hivernales. Il a financé la plus grande part du projet.

L'utilisation du tunnel des Échelles comme premier site expérimental a été rendue possible grâce à la participation financière de deux autres maîtres d'ouvrage, souhaitant participer à l'évaluation de ces procédés : l'ATMB, gestionnaire de l'Autoroute et du Tunnel du Mont Blanc et RFF (Réseau Ferré de France), maître d'ouvrage des tunnels ferroviaires, pour la plupart anciens.

Les travaux se sont déroulés de mi-mai à fin juillet 2013 pour mettre en œuvre les trois procédés sur les cents premiers mètres du tunnel, à partir de la tête située du côté des Échelles.

Le cadre expérimental

Un protocole de suivi de l'expérimentation a été signé en avril 2013 entre le Département de la Savoie (73), le CETU et ETANDEX. Les services techniques du Conseil général ont assuré la maîtrise d'œuvre de l'opération ; le CETU lui a apporté une assistance à maître d'œuvre (AMOE) et a fait appel au Département Laboratoire du CETE de Lyon (aujourd'hui Direction Territoriale Centre Est du CEREMA) pour réaliser le contrôle extérieur des travaux réalisés par l'entreprise ETANDEX. La mission de Coordonnateur en matière de sécurité et de protection de la santé a été confiée à BECS.

Après réception des travaux et établissement d'un premier rapport d'évaluation, des contrôles réguliers seront effectués pendant 10 ans par le réseau scientifique et technique du MEDDE, pour vérifier la durabilité des procédés. Cette durée correspond à celle de la garantie assurée par l'entreprise bien que l'ouvrage, en tant qu'ouvrage d'infrastructure routière, soit exclu du champ de l'obligation d'assurance décennale.

Les trois procédés ECOMINT

Les trois procédés dont les principes sont décrits ci-après permettent de répondre à la plupart des configurations et géométries d'ouvrages : tunnels en béton projeté, coffré en place ou préfabriqué, tunnels en maçonneries, tunnels au rocher.

1. Principe du procédé TECTOPROOF CA

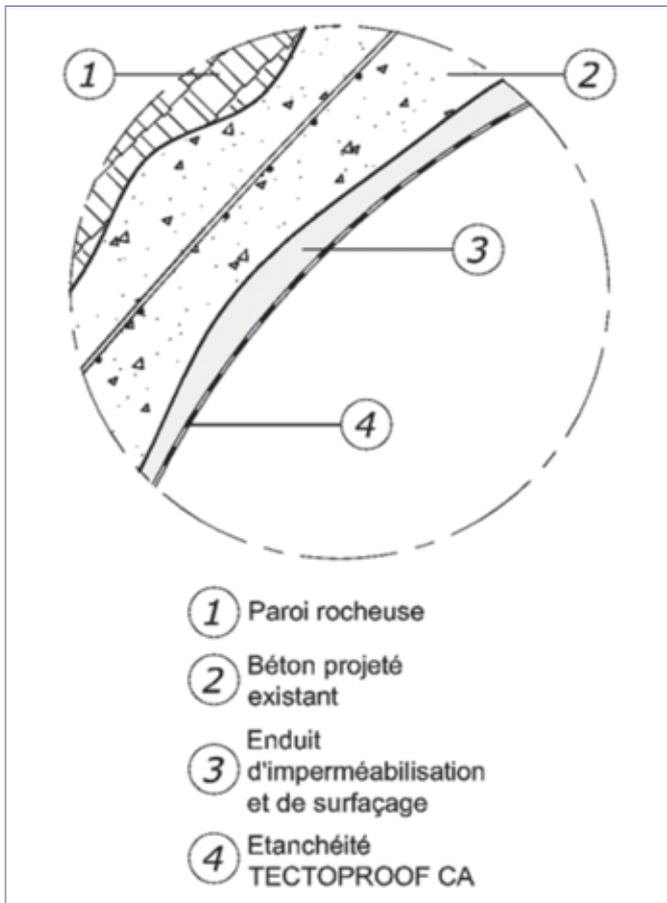


Illustration 40 : Principe du procédé adhérent TECTOPROOF CA

Le TECTOPROOF CA est un Système d'Étanchéité Liquide Armé (SEL-A), adhérent à l'intrados, composé :

- d'un primaire époxydique pare-vapeur ;
- d'un composite verre ou carbone-époxy constitué d'une matrice époxy pare-vapeur et d'un tissu de verre (ou de carbone) de grammage adapté à la résistance à la fissuration souhaitée.

Le composite a une épaisseur n'excédant pas 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.

Le procédé est commercialisé par la société SPPM. Il bénéficie d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) du CSTB pour des applications en bâtiments pour du cuvelage en sous-pression. Il a également obtenu un Avis d'Expert AFTES pour des applications en souterrain (Mahuet, 2013).

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

Supports admissibles :

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

- d'un béton coulé en place, éventuellement ragréé ;
 - d'un béton projeté ;
 - d'une maçonnerie, revêtue d'un enduit de surfacage.
- La mise en place de zones drainantes peut s'avérer nécessaire pour éviter la mise en charge de l'ouvrage.

Le retour d'expérience a montré que la planéité du support est très importante pour obtenir une adhérence sur la totalité de la surface du support.

La maîtrise des venues d'eau pendant les phases d'application est une condition indispensable à l'efficacité du procédé, un support humide mais sans égouttement est toutefois acceptable.

2. Principe du procédé MasterSeal 345

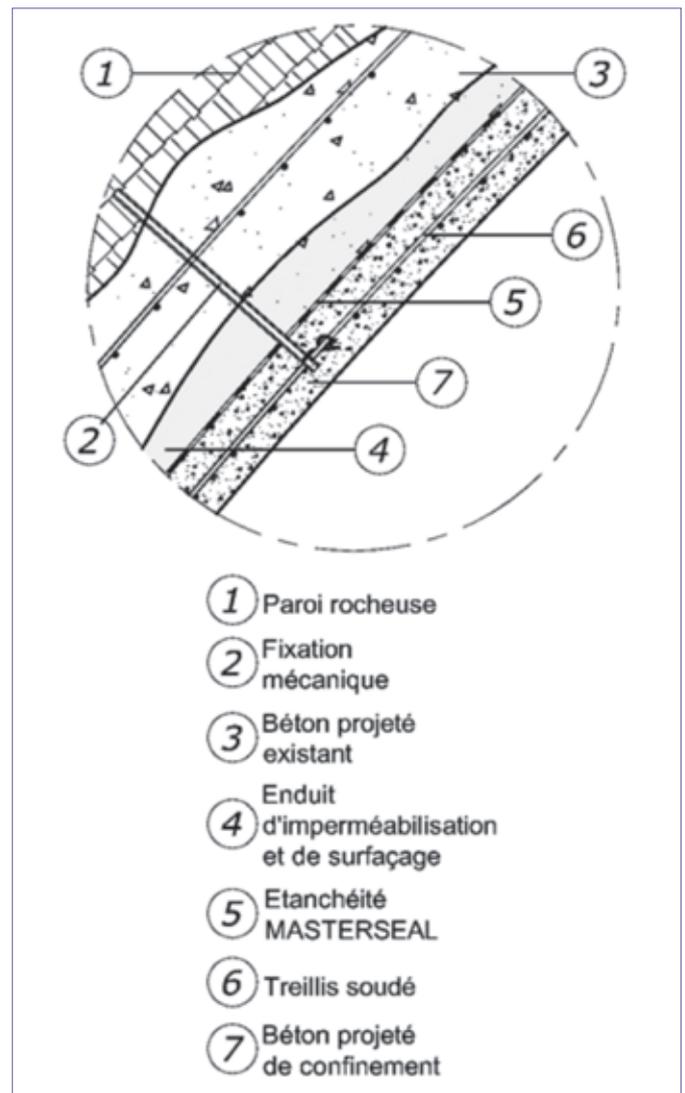


Illustration 41 : Principe du procédé « sandwich » MasterSeal 345

Le procédé MasterSeal 345 est un Système d'Étanchéité Projeté Confiné (SEPC), c'est-à-dire un « sandwich » adhérent à l'intrados de la structure et composé :

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

L'épaisseur de la membrane étanche est de l'ordre de 3 mm ; celle du béton de confinement et de protection est de 5 cm minimum.

Dans l'application au tunnel des Échelles, le choix a été fait d'armer le béton de confinement et de l'ancrer dans le rocher.

Le produit d'étanchéité MasterSeal 345 est commercialisé par la société BASF CC. Il fait l'objet d'un Avis d'Expert du GT 9 de l'AFTES.

Supports admissibles :

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 (2 à 3 cm) ;
- maçonneries, éventuellement enduites (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, un support humide mais sans égouttement est toutefois acceptable.

3. Principe du procédé PROTHEANE AC/TI

Le PROTHEANE AC/TI est un procédé par coque semi-indépendante drainée ancrée. Il est composé :

- d'une nappe drainante de type géo-grille fixée au support ;
- 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).

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.

Le procédé est commercialisé par la société SPPM.

Le retour d'expérience a montré que ce procédé est actuellement trop délicat à mettre en œuvre pour être réutilisé dans d'autres ouvrages. Les travaux d'optimisation sont actuellement en stand-by.

Supports admissibles :

Ce procédé peut théoriquement être mis en œuvre dans tous les types de tunnels ; il est particulièrement adapté aux tunnels au rocher.

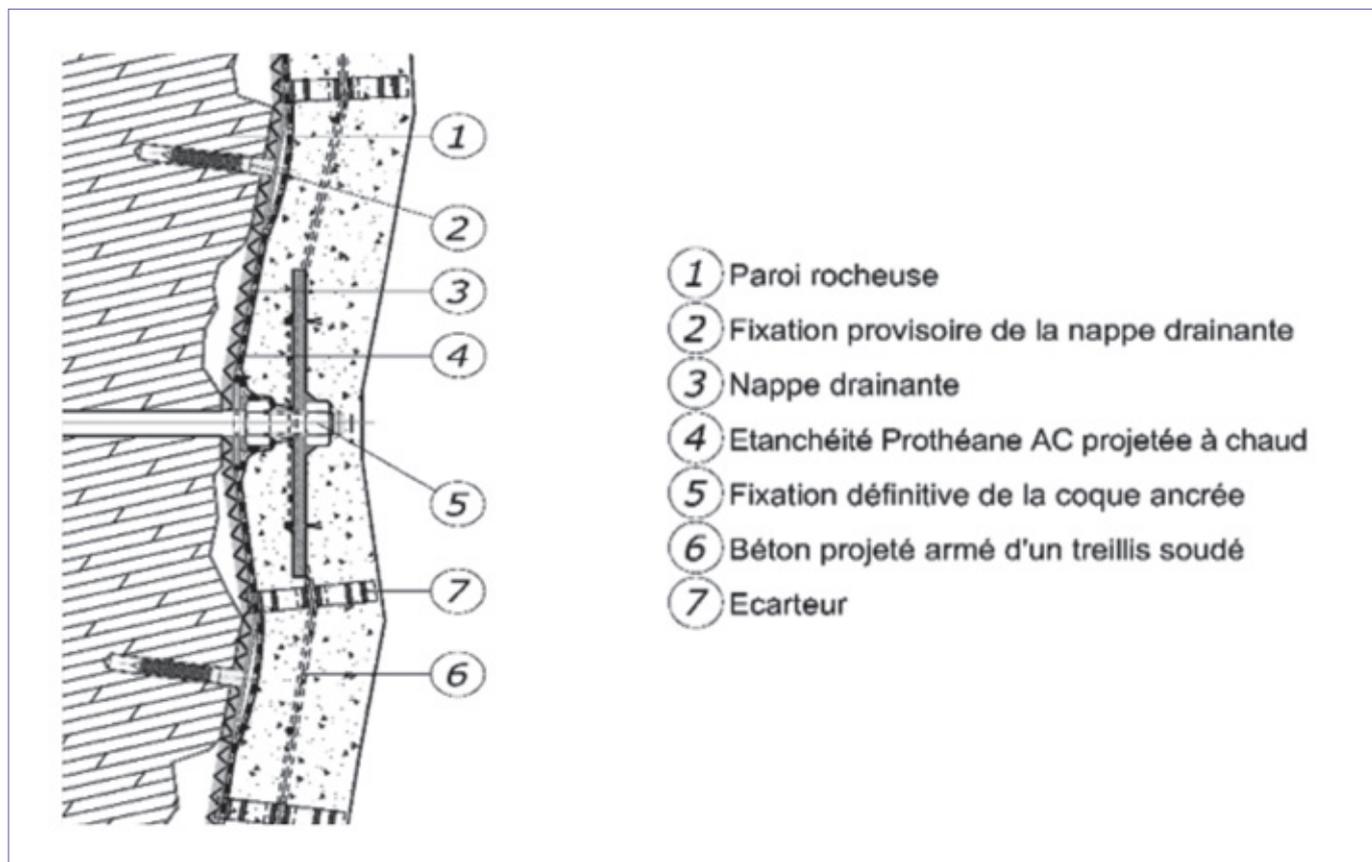


Illustration 42 : Principe de la coque ancrée PROTHEANE AC/TI

CONTRIBUTEURS

Les principaux rédacteurs de ce document sont D. CHAMOLEY, C. LARIVE.

Ont également contribué à son élaboration progressive F. PILLANT, G. CHATENAUD, F. PAILLETTE, S. PETIT, D. SUBRIN.

La relecture a été assurée par J. DOREAU-MALIOCHE, G. HAMAIDE, F. ROBERT, E. PREMAT, M. DEFFAYET.

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

