

Procédé d'étanchement et de revêtement de tunnels par coque en béton projeté indépendante

Introduction

Les tunnels routiers réalisés aujourd'hui sont intégralement étanchés au moment de leur construction pour assurer la sécurité et le confort des usagers, réduire les contraintes d'exploitation et améliorer la pérennité des ouvrages.

Cette mesure est le fruit du retour d'expérience sur les tunnels anciens qui, quant à eux, ne sont pas tous étanchés. Cette absence d'étanchéité, en présence de venues d'eau, est souvent dangereuse en raison des risques de chutes de glaçons et de formation de plaques de verglas sur la chaussée.

Outre le danger pour les usagers, la présence de venues d'eau provoque une détérioration rapide des équipements en tunnels et nécessite, en période hivernale, des interventions fréquentes et très contraignantes des services d'exploitation. Ces deux éléments (coûts et gêne à l'exploitation) doivent également être pris en compte dans le cadre d'une réflexion sur la pertinence de travaux d'étanchéité.

Au début des années 80, parallèlement à la mise en place systématique d'une étanchéité lors de la construction de tunnels neufs, des investissements importants ont été réalisés dans les tunnels existants pour le traitement des venues d'eau dangereuses et l'amélioration de leur niveau de service (gabarits, tracés, sécurité).

Dans ce cadre, de nombreux tunnels ont été rénovés et le CETU a été très souvent associé à ces opérations. Au cours de ces différents projets, de nouvelles techniques ont été mises au point puis expérimentées, notamment dans le domaine de l'étanchement des ouvrages.

La première note d'information n°9 du CETU de 1999 présente une solution d'étanchement et de revêtement de tunnel par coque indépendante en béton projeté. La présente actualisation de cette note est enrichie de l'expérience de réhabilitations réalisées depuis 1999.

L'emploi de la solution exposée concerne la réhabilitation de tunnels ou parties de tunnels, revêtus ou non, dont la stabilité doit être assurée préalablement (un diagnostic doit déterminer la nécessité et le type de confortement à prévoir).

Le CETU détient le brevet d'invention¹ du procédé d'étanchement et de revêtement de tunnel par coque indépendante en béton projeté décrit dans cette note. Il souhaite ainsi pouvoir garder un contrôle sur l'emploi du procédé en veillant sur la qualité des travaux des ouvrages réparés avec cette technique. Cependant, son utilisation est libre et gratuite.

L'objet de cette nouvelle présentation est d'attirer l'attention sur le fait que certains aspects de la technique doivent être particulièrement maîtrisés afin de garantir la qualité du résultat. Moyennant le respect de ces critères, un bon comportement dans le temps peut être escompté, comme cela a été observé sur les ouvrages ainsi rénovés.

¹. Invention de Gilles Chatenoud.



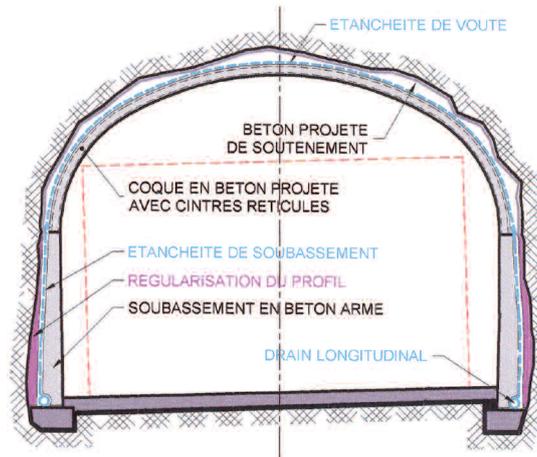
Aspects des tunnels du Galibier

et des Aravis rénovés avec le procédé.

Description de la technique

Le procédé d'étanchement et de revêtement par coque indépendante en béton projeté comporte les éléments suivants :

- deux soubassements en béton armé,
- une ossature métallique ancrée sur les soubassements,
- une étanchéité continue,
- un revêtement voûté en béton projeté dont la géométrie doit être adaptée au gabarit routier choisi pour la rénovation de l'ouvrage.

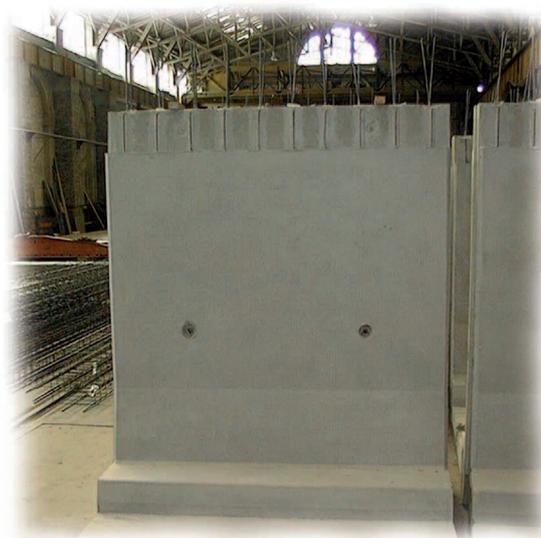


Les soubassements

Ils ont pour but :

1. de supporter la coque
2. d'assurer une résistance renforcée vis-à-vis des chocs de véhicules
3. d'intégrer les dispositifs de collecte des eaux recueillies par l'étanchéité
4. d'obtenir un parement lisse et une géométrie régulière de la partie vue par l'utilisateur.

Ils sont réalisés en béton armé, coffré ou projeté, sur une hauteur recommandée d'environ deux mètres (prise en compte d'un choc éventuel de poids-lourd). Leur partie supérieure comporte des aciers en attente pour la liaison avec la coque.



Piédroits préfabriqués pour le tunnel du Galibier.



Soubassements en béton projeté taloché au tunnel des Aravis.

Piédroits conservés sous la coque du tunnel de Sisteron.

L'ossature métallique

Elle est destinée à assurer la solidité de la coque en armant le béton de la voûte. Le dimensionnement des armatures est fonction de la portée de la voûte et des différents cas de charges à prendre en compte. La géométrie de l'ossature détermine l'épaisseur finale du revêtement.

L'ossature métallique est constituée de cintres réticulés légers, d'armatures et de treillis soudés. Les cintres sont généralement disposés tous les 1,50 m à 1,80 m, en fonction des résistances voulues et entretoisés par des armatures longitudinales.

Un « fond de coffrage » est fixé sur l'extrados de l'ossature (par exemple métal déployé ou géotextile) pour permettre l'accrochage du béton. Il est placé de manière à favoriser le bon enrobage des aciers d'extrados.

L'ensemble est préfabriqué à l'extérieur par tronçons de longueur adaptée à l'ouvrage, transportés ensuite dans le tunnel où ils sont fixés sur les soubassements par boulonnage des pieds de cintres.

Des compléments d'armatures à l'intrados de l'ossature sont effectués dans le tunnel après une première phase de projection de béton.



Aire de préfabrication de l'ossature au tunnel de Fort l'Écluse.



Transport d'un anneau d'ossature au tunnel de Sisteron.



Ossature métallique posée sur les soubassements formant piédroits au tunnel des Aravis.

L'étanchéité et l'isolation

L'étanchéité arrête les eaux en provenance du massif et les ramène vers des drains longitudinaux placés en base des soubassements. Elle peut aussi être complétée par une protection thermique entre coque et étanchéité pour éviter le gel des eaux collectées.

La réalisation de l'étanchéité de l'ouvrage s'exécute en deux phases. D'abord celle des soubassements pendant leur construction, puis celle de la coque indépendante formant la voûte.

Pour une garantie de qualité, les opérations liées à l'étanchéité sont effectuées par une entreprise spécialisée qui doit faire intervenir du personnel certifié ASQUAL².

Le complexe d'étanchéité et d'isolation comprend une membrane d'étanchéité translucide EC-F (famille des polyéthylènes basse densité) qui présente la particularité d'être thermosoudable sur l'isolant. L'épaisseur optimale de la membrane EC-F est de 15/10 mm.

L'isolant est une feuille de mousse réticulée à cellules fermées qui, outre ses propriétés thermiques, assure la protection mécanique de la membrane d'étanchéité.

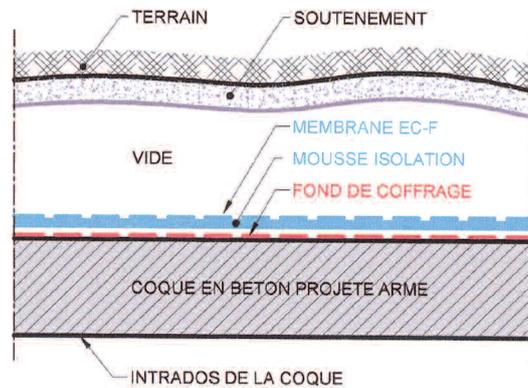
Dans l'emprise des soubassements, le parement de l'excavation est régularisé pour ne pas présenter des creux et des bosses qui gêneraient la mise en place du complexe étanche et isolant qui manque de souplesse.

Le complexe est alors fixé à l'excavation et raccordé aux drains avant de réaliser le béton coffré formant les piédroits. La membrane d'étanchéité EC-F dépasse l'arase supérieure des soubassements pour permettre la soudure de l'étanchéité de voûte.

Les lès du complexe d'étanchéité sont assemblés « à plat » par soudure pour recouvrir un anneau d'ossature métallique sur lequel l'étanchéité est ensuite déroulée. L'ensemble est transporté dans le tunnel et mis en place sur les soubassements.

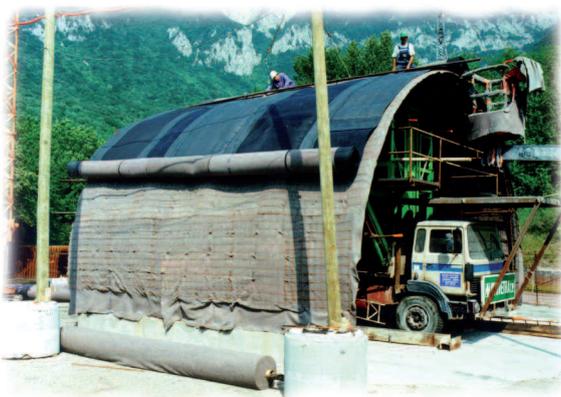
En tunnel, on effectue la soudure transversale entre les membranes EC-F des anneaux contigus et la soudure horizontale avec celle des piédroits.

La position respective des différents éléments est illustrée dans le schéma suivant :



Une solution variante pour l'étanchéité consiste à fixer traditionnellement un complexe constitué d'un géotextile drainant et d'une feuille PVC de 2 mm d'épaisseur. Cette variante a été mise en œuvre au tunnel du Galibier sans isolation thermique (tunnel fermé l'hiver). Lorsqu'une isolation est nécessaire, elle est constituée d'une feuille de mousse thermo soudée sur l'étanchéité ou disposée sur l'extrados de l'ossature.

Cette variante est plus particulièrement adaptée aux cas où l'espace résiduel entre la coque et l'excavation est réduit.



Déroulement de l'étanchéité et du fond de coffrage sur l'ossature métallique du tunnel de Fort l'Écluse.



Coque formant « fausse tête » en cours de travaux au tunnel des Aravis.

2. Se reporter aux recommandations du GT9 de l'AFTES « Étanchéité des ouvrages souterrains », TOS n°162 de novembre-décembre 2000.

Le revêtement de voûte

Le revêtement est constitué de béton projeté enrobant l'ensemble de l'ossature métallique. L'épaisseur d'enrobage (côté intrados) est conforme aux règles du béton armé sans toutefois être inférieure à 30 mm.

La voie sèche est recommandée.

La projection au travers des aciers est délicate. Il est donc préconisé de faire appel à des opérateurs certifiés ASQUAPRO (Association pour la QUALité de la PROjection des bétons et mortiers).

La projection s'effectue toujours suivant le même enchaînement :

- projection d'une passe fine généralisée pour raidir le « fond de coffrage »,
- passes d'enrobage des cintres réticulés en procédant du bas vers la clé,
- passes de remplissage entre cintres (entrecoupées par la pose des compléments d'armatures),
- couche de parement.

La couche de parement peut faire l'objet de différents types de finitions, pouvant jouer sur la texture ou la couleur du béton.

Des joints de dilatation transversaux sont à prévoir pour permettre les déformations de l'ouvrage. L'intervalle entre joints doit être supérieur à 10 m pour permettre de répartir longitudinalement les sollicitations de charges ponctuelles accidentelles.



Projection du béton de la coque du tunnel de Sisteron avec protection des piédroits conservés.

Dimensionnement

Une justification par le calcul est demandée pour les piédroits et pour la coque, selon les règles du béton armé étendues au béton projeté.

La condition de non-fragilité en flexion simple doit être vérifiée.

Le CCTP précise les charges à prendre en compte. On retient généralement les hypothèses suivantes :

- La fissuration est considérée comme préjudiciable.

- La coque est calculée sans butée, avec une rotule entre piédroits et voûte.
- On prend le cas le plus défavorable entre encastrement et rotule pour la liaison piédroit-fondation.
- On retient conventionnellement une action accidentelle oblique d'un poids lourd à 60 km/h à 1,50 m de hauteur (cf. annexe D du BAEL).
- On ne prend pas en compte de charge de terrain car l'excavation doit être stabilisée, ni de poussée de la glace car le système comporte une isolation thermique adéquate.

Tenue au feu

Dans les tunnels courts, domaine d'emploi privilégié de cette technique, la tenue au feu n'est pas réglementée. En revanche, dans les tunnels de plus de 300 m, soumis au décret du 24 juin 2005 modifié par le décret du 8 novembre 2006 relatif à la sécurité dans les tunnels routiers, une étude complémentaire de comportement au feu doit être menée en prenant en compte la nature exacte de chacun des matériaux mis en œuvre (coque, complexe d'étanchéité et d'isolation).

Intérêt technique

La coque est très résistante et garantit une marge de sécurité importante, en particulier par rapport à d'éventuels chocs de poids lourds hors-gabarit.

Les essais réalisés sur la coque de revêtement du tunnel de Fort l'Écluse d'épaisseur moyenne 17 cm ont montré qu'elle supportait une charge ponctuelle de 15 tonnes en clé de voûte en restant dans le domaine élastique.

Intérêt pour l'exploitation pendant les travaux

Ce procédé présente l'avantage de ne pas recourir à des outils encombrants tels que les portiques de pose de l'étanchéité et les coffrages utilisés dans la méthode traditionnelle (qui consiste à construire un revêtement en béton coffré pour protéger une étanchéité fixée à l'excavation).

De plus, une partie des travaux peut être réalisée **hors tunnel**, sans perturber le trafic routier. La préfabrication des anneaux d'ossature et la pose de l'étanchéité de la

coque se réalisent sur une aire extérieure à proximité du tunnel.

La construction des piédroits peut s'exécuter alternativement en maintenant la circulation sur une voie. Seules les opérations de pose de l'ossature et de projection du béton de la coque nécessitent la fermeture du tunnel. Cela permet d'éviter l'interdiction totale d'un itinéraire en maintenant par exemple la circulation pendant la journée, mise à profit pour pré-fabriquer les anneaux d'ossature.

Intérêt économique

Le procédé permet des économies conséquentes :

- à l'absence de coffrage et de portique de pose d'étanchéité dont le coût important est difficile à amortir dans les tunnels courts,
- à la réduction des volumes de béton (pas de remplissage des vides entre la coque et le terrain),
- à la réduction de la durée du chantier,
- à un impact moindre sur le trafic routier pendant les travaux.

25, avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 Bron Cedex

☎ 33 (0)4 72 14 34 00

📠 33 (0)4 72 14 34 30

✉ cetu@equipement.gouv.fr

www.cetu.equipement.gouv.fr

