

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT
DIRECTION DES ROUTES

dossier pilote des tunnels génie civil

section 5 étanchement et revêtement

Juillet 1998

CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS
25, AVENUE FRANÇOIS-MITERRAND - CASE N°1 - 69674 BRON CEDEX - FRANCE
TEL : 04 72 14 34 00 - TELECOPIE : 04 72 14 34 30

I.S.B.N. 2-11-084743-3

SOMMAIRE

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| Chapitre 1 | Préambule | 7 |
| 1.1 | Nécessité de l'étanchement des tunnels | 7 |
| 1.1.1 | Sécurité et confort des usagers | 7 |
| 1.1.2 | Dégradation des ouvrages | 8 |
| 1.1.3 | Degré d'étanchement à atteindre | 8 |
| 1.2 | Différentes fonctions du revêtement | 8 |
| 1.2.1 | Fonction mécanique | 8 |
| 1.2.2 | Fonction d'étanchéité | 8 |
| 1.2.3 | Fonction liée à l'exploitation | 8 |
| 1.3 | Cas des tunnels anciens | 8 |
| Chapitre 2 | Étanchement | 9 |
| 2.1 | Principes généraux d'étanchement | 9 |
| 2.1.1 | Trois principes d'étanchement | 9 |
| 2.1.2 | Aspects divers du problème de l'étanchement | 10 |
| 2.2 | Procédés d'étanchement | 11 |
| 2.2.1 | Drainage | 11 |
| 2.2.2 | Étanchéité propre du revêtement | 13 |
| 2.2.3 | Couches d'étanchéité | 13 |
| 2.2.4 | Injections | 14 |
| 2.2.5 | Joint | 14 |
| 2.3 | Choix du procédé d'étanchement | 15 |
| 2.3.1 | Conditions hydrauliques | 15 |
| 2.3.2 | Étanchement par drainage | 15 |
| 2.3.3 | Étanchement par le revêtement | 15 |
| 2.3.4 | Étanchement par une couche d'étanchéité | 15 |
| 2.3.5 | Tableau récapitulatif | 16 |
| Chapitre 3 | Constitution des revêtements | 17 |
| 3.1 | Revêtements en béton coffré | 17 |
| 3.1.1 | Principales conditions à satisfaire | 17 |
| 3.1.2 | Cas d'utilisation du béton armé | 18 |
| 3.1.3 | Retrait du béton | 18 |
| 3.2 | Revêtement des tunnels réalisés au tunnelier | 19 |
| 3.2.1 | Utilisation de voussoirs | 19 |
| 3.2.2 | Béton extrudé | 20 |
| 3.3 | Autres types de revêtement | 20 |
| 3.3.1 | Béton projeté | 20 |
| 3.3.2 | Voûtes actives | 20 |
| 3.4 | Habillage des parois des tunnels | 20 |
| 3.4.1 | Définition et rôle des habillages | 20 |
| 3.4.2 | Principaux habillages en voûtes | 21 |
| 3.4.3 | Principaux habillages en piédroits | 22 |
| 3.4.4 | Qualités requises par les habillages | 24 |
| Chapitre 4 | Surveillance à long terme | 25 |
| 4.1 | Objectifs | 25 |
| 4.2 | Moyens | 25 |
| 4.2.1 | Inspection | 25 |
| 4.2.2 | Auscultation | 25 |
| 4.3 | Intérêt de l'auscultation des tunnels en service | 26 |
| | Bibliographie | 27 |

Préambule

L'étanchement et le revêtement présentent trois caractéristiques qui justifient leur regroupement au sein de la présente section :

- L'étanchement et le revêtement sont souvent mis en oeuvre après que l'excavation du tunnel ait été réalisée ; ce sont beaucoup plus, dans ce cas là, des travaux "en souterrain" que des travaux "souterrains" et une bonne partie des spécifications des travaux à l'air libre leur est applicable.*
- La qualité de l'étanchement et du revêtement conditionne directement la qualité du service rendu à l'utilisateur, ce qui veut dire que leur conception et leur coût dépendent directement de la qualité que l'on veut obtenir et donc de la classe de l'itinéraire et du volume de trafic.*
- Enfin étanchement et revêtement sont dans la plupart des cas dépendants l'un de l'autre, le revêtement contribuant à l'étanchement de l'ouvrage.*

1.1 - Nécessité de l'étanchement des tunnels

Rares sont les ouvrages souterrains où, lors de l'exécution ou de l'exploitation, l'on ne rencontre pas des venues d'eau.

Dans les sols se posent des problèmes de nappes (nappes phréatiques ou nappes suspendues dans des horizons perméables, réalimentées ou non).

Dans les roches, les venues d'eau importantes sont le plus souvent localisées (roches broyées, failles, zones fracturées, karsts). Des venues d'eau diffuses résultant de la porosité de la roche ou de sa fissuration sont courantes.

Les procédés constructifs à utiliser pour travailler en présence d'eau sont exposés à la section 4 ("Procédés de creusement et de soutènement") et ne sont pas repris dans la présente section.

Les précautions à prendre le cas échéant vis à vis des eaux profondes et superficielles sont exposées à la section 9 ("Impact de la construction sur l'environnement").

1.1.1 - Sécurité et confort des usagers

Après mise en service de l'ouvrage, la présence d'eau dans le tunnel nuit à la sécurité et au confort de l'utilisateur :

- Les ruissellements d'eau à travers le revêtement peuvent entraîner la présence permanente d'eau sur la chaussée, augmentant les difficultés de circulation du fait de la projection d'eau au passage des véhicules, de la moins bonne adhérence des pneumatiques sur sol mouillé, et de la dégradation progressive de la chaussée.

- En cas de gel, la formation de glace en voûte (stalactites risquant de tomber sur les véhicules) ou en chaussée représente une source de danger supplémentaire.

- Les venues d'eau, même limitées à des suintements, provoquent des taches sur la voûte et les piédroits qui noircissent avec le temps en accrochant les suies émises par les véhicules. Cette salissure accélérée est un facteur de diminution de la luminance générale et par voie de conséquence de la visibilité. Elle n'est pas agréable à l'oeil et est source d'inconfort pour l'utilisateur.

1.1.2 - Dégradation des ouvrages

Les venues d'eau non maîtrisées peuvent également conduire à une dégradation accélérée des ouvrages :

- L'écoulement de l'eau à travers le béton du revêtement provoque à la longue sa détérioration par attaque chimique ou, quand la pression hydrostatique extérieure est élevée, par érosion mécanique, ou encore par action du gel le cas échéant.
- Des ruissellements permanents finissent par dégrader la chaussée et par abîmer les équipements.
- Dans les conduits d'air frais, la présence d'eau en paroi peut entraîner en hiver une réduction importante, voire une obturation de la section des conduits par formation de glace et une surcharge des structures dans le cas d'un plafond.

1.1.3 - Degré d'étanchement à atteindre

Pour les tunnels neufs, l'objectif sera dans la plupart des cas d'obtenir un étanchement parfait de l'ouvrage, c'est à dire de ramener à une valeur nulle le débit pénétrant à l'intérieur de la section. Ce n'est que lorsque la qualité du terrain, la catégorie de l'itinéraire et la faible importance du trafic font s'interroger sur la nécessité d'un revêtement (cf. 1.2 ci-après) que l'on peut accepter un étanchement partiel.

Mais il faudra de toute façon maîtriser les venues d'eau et notamment empêcher que l'eau pénètre dans l'espace utile réservé à la circulation et à la ventilation, et réduire les débits percolants à une valeur jugée compatible avec la pérennité de l'ouvrage et les conditions d'exploitation.

1.2 - Différentes fonctions du revêtement

On peut définir le revêtement d'un tunnel comme la structure résistante placée le plus à l'intrados du tunnel. Cette position dans l'ouvrage conduit à faire jouer au revêtement plusieurs fonctions possibles :

1.2.1 - Fonction mécanique

C'est la fonction la plus traditionnelle du revêtement, conçu pour garantir la stabilité à long terme de l'ouvrage. La relation entre soutènement et revêtement et le dimensionnement du revêtement vis à vis de sa fonction mécanique sont examinés à la section 3 ("Conception et dimensionnement").

1.2.2 - Fonction d'étanchéité

Le revêtement joue un rôle important dans l'étanchement de l'ouvrage :

- soit qu'il l'assure à lui seul (voussoirs préfabriqués avec joints par exemple),
- soit qu'il assure l'étanchéité de surface (béton coffré dont seuls les joints de reprise sont traités en joints d'étanchéité),
- soit qu'il joue le rôle de support pour une étanchéité d'intrados ou de soutien et de protection pour une étanchéité d'extrados.

1.2.3 - Fonction liée à l'exploitation

a) L'intrados d'un tunnel reste la seule partie visible pour l'usager et son aspect, voire sa forme doivent être pris en compte dans sa conception. En fonction du type de tunnel, de sa longueur, de la nature et de l'importance du trafic, il convient de choisir un niveau de confort de conduite auquel contribuent la qualité des parements et leur éclairage.

Le choix à cette fin de la constitution du revêtement et son habillage possible sont développés au chapitre 3.

b) Lorsque le tunnel possède un système de ventilation mécanique, un revêtement lisse contribue à minimiser les pertes de charge.

1.3 - Cas des tunnels anciens

Parce qu'ils ne comportent pas d'étanchement ou que les dispositifs prévus à l'origine ont été rendus inopérants par vieillissement, les tunnels anciens présentent souvent des défauts ou désordres qui justifient des interventions de réparation ou de modernisation.

Une bonne part des considérations développées aux chapitres 2 et 3 suivants peuvent être utiles à la conception de ces opérations de rénovation des tunnels anciens.

Toutefois, certaines contraintes spécifiques, telles que la nécessité d'exécuter les travaux sous circulation ou le maintien de la hauteur libre des ouvrages, peuvent conduire à adopter des solutions ne comportant pas la mise en place d'un véritable revêtement, mais d'un habillage plus ou moins important des parois du tunnel (cf. 3.4).

Étanchement

On définit l'étanchement comme une opération visant à limiter à une valeur acceptable (qui peut être nulle) le débit d'eau pénétrant à l'intérieur de l'ouvrage souterrain. Cette limitation du débit peut être recherchée sur tout ou partie du profil en travers.

Le mode d'étanchement de l'ouvrage doit être au moins sommairement analysé dès les études initiales, car il a une influence particulière sur les différents points suivants :

- la définition géométrique de l'ouvrage :

profil en long facilitant ou non l'exhaure naturelle des eaux, section transversale adaptée ou non aux pressions hydrostatiques, dimensionnement des caniveaux d'exhaure,

- la définition de la structure :

les procédés d'étanchement envisageables ont une incidence directe sur la constitution, les modalités et les phases d'exécution du revêtement,

- l'estimation prévisionnelle du coût des travaux :

le coût de l'étanchement représente un pourcentage du coût total de l'ouvrage qui ne peut pas être négligé.

2.1 - Principes généraux d'étanchement

Avant de décrire les méthodes d'étanchement, il est nécessaire d'en exposer les principes de base.

2.1.1 - Trois principes d'étanchement (fig. 2.1)

L'étanchement d'un ouvrage souterrain peut être obtenu en adoptant l'une des attitudes suivantes vis-à-vis de l'eau contenue dans le terrain encaissant :

2.1.1.1 - Constituer sur son cheminement une barrière étanche (béton de revêtement éventuellement trai-

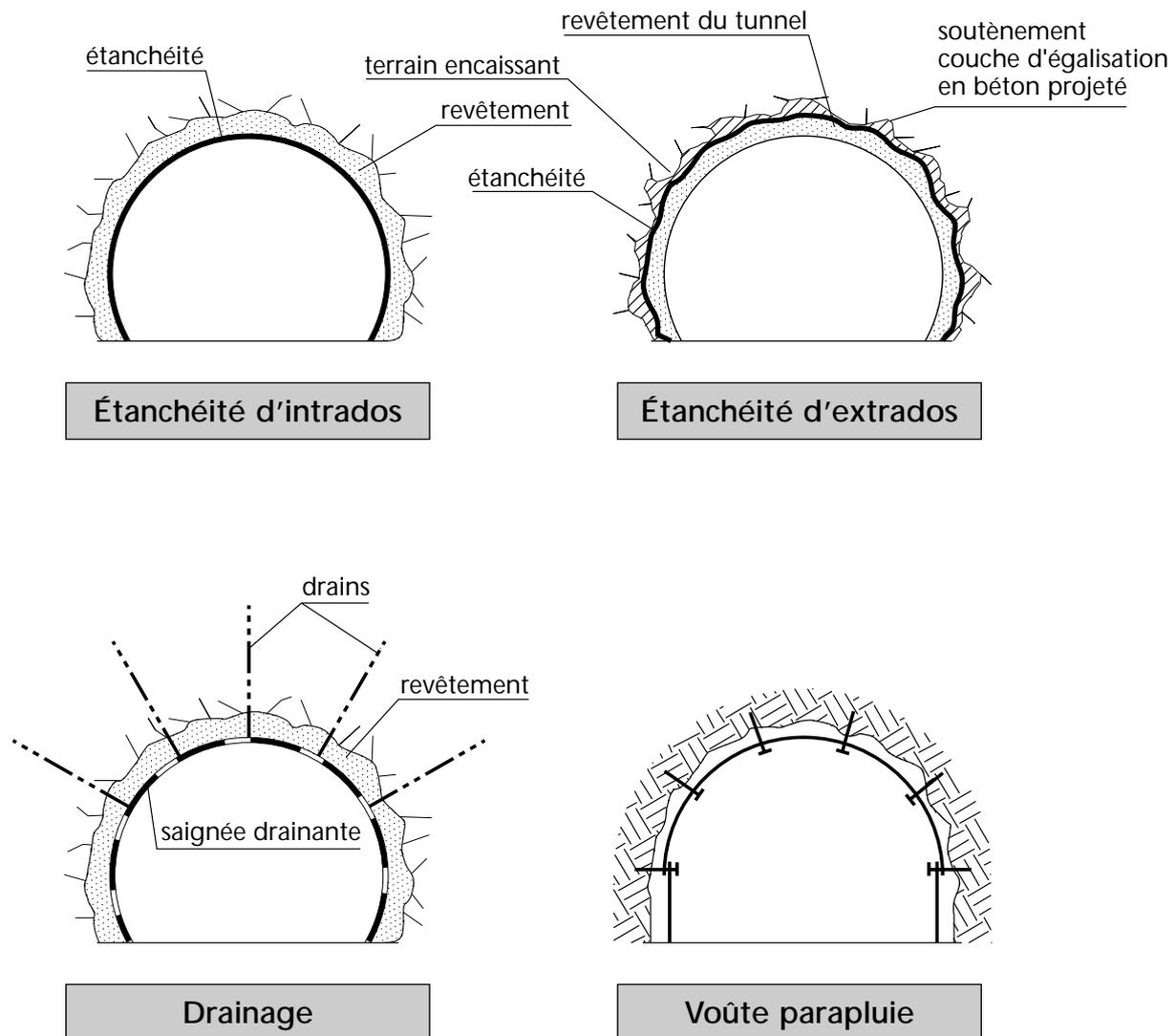
té, injections, couches d'étanchéité).

Le dimensionnement du revêtement et le choix de la forme de la section transversale seront conditionnés par la pression hydrostatique totale si la barrière étanche a été mise en œuvre sur tout le pourtour de la section.

2.1.1.2 - Réduire sa pression au moyen d'un dispositif de drainage et la canaliser (drainage, galerie de dérivation, etc...). Le facteur à prendre en compte pour le dimensionnement des organes d'évacuation est alors le débit d'écoulement prévisible.

2.1.1.3 - La laisser circuler sans intervenir dans son écoulement et s'en abriter (voûte parapluie, faux piédroits, etc...).

L'eau circule alors librement, sauf dans l'espace utile qui est protégé. Mais cette solution présente l'inconvénient de masquer l'intrados donc d'empêcher sa surveillance visuelle.



▲ Fig. 2.1

Principaux types d'étanchement

2.1.2 - Aspects divers du problème de l'étanchement

Sauf pour les ouvrages courts, il est rare que les problèmes d'étanchement se posent de la même manière sur toute la longueur de l'ouvrage :

- en raison des variations dans la nature des terrains (perméabilité des diverses couches, présence de plusieurs nappes ou de circulations d'eau préférentielles, érodabilité et tenue à l'eau variables, etc...).

- parce que la gravité des problèmes n'est pas la même. En particulier, on doit tenir compte du risque de gel dans les zones de têtes.

Il en résulte qu'on doit s'assurer que le procédé choisi peut être adapté à des conditions variées. D'autre part, il ne faut pas oublier que l'eau que l'on arrête en un point a tendance à ressortir ailleurs et à se faire un passage au droit des discontinuités de construction. Une étanchéité ne vaut que ce que valent ses points les plus faibles (raccords, joints, etc...).

2.2 - Procédés d'étanchement

2.2.1 - Drainage

Il est traité sous cette rubrique uniquement des dispositifs permanents, utilisables pour les tunnels neufs ou déjà en exploitation.



Exemple de captage des venues d'eau en phase de construction

2.2.1.1 - Prédrainage

Le prédrainage du terrain encaissant est une opération qui consiste après le creusement et avant l'exécution du revêtement, pour faciliter sa mise en place, à capter les venues d'eau ponctuelles importantes et à les recueillir dans un conduit longitudinal d'évacuation. Ce système conservé après exécution du revêtement, participe s'il n'a pas été bouché par des injections, à l'étanchement permanent du tunnel.

Il peut être réalisé de diverses manières :

- les venues d'eau localisées aux fissures du rocher sont recueillies dans des tuyaux, le captage à l'émergence étant réalisé à l'aide d'un mortier spécial,
- les suintements diffus sont plus difficiles à recueillir : on peut s'aider de plaques étanches,
- les venues d'eau importantes (karsts, failles) sont

captées par un dispositif spécial pouvant nécessiter la construction d'un ouvrage en béton,

- on peut aussi mettre en œuvre entre le terrain (ou le soutènement) et le revêtement un complexe de drainage (matériau drainant avec une feuille de filtrage à l'extrados et une feuille d'étanchéité à l'intrados).

Dans tous les cas, le diamètre des tuyaux de collecte doit être dimensionné largement par rapport aux débits. Cela est particulièrement important dans les terrains karstiques où il faut également traiter de cette manière des conduits temporairement secs.

Ce surdimensionnement a un double but :

- éviter la mise en charge de l'écoulement en périodes de venues d'eau plus abondantes que la moyenne,
- limiter le risque de colmatage du dispositif par les matériaux entraînés ou les dépôts dus à la précipitation de sels dissous dans l'eau.

On doit noter que, pour être véritablement pérenne, un dispositif de drainage doit pouvoir être entretenu ou reconstitué facilement, ce qui explique que le drainage ne pourra généralement constituer qu'une solution partielle ou temporaire (cf. 2.3.2).

2.2.1.2 - Drains forés

Les drains forés peuvent être réalisés avant ou après exécution du revêtement. Le but de ces drains est de créer au large un cheminement préférentiel pour recueillir l'eau.

En particulier, lorsque les venues d'eau se manifestent sous forme de suintements diffus, il est intéressant en complément du prédrainage, de réaliser de tels drains, en diamètre 50 mm environ.

Les forages sont généralement faits dans des plans perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage pour des raisons d'économie et de commodité. Mais si la fracturation du massif rocheux comporte des discontinuités relativement plus ouvertes dans certains plans, il est préférable de chercher à les recouper par des forages obliques.

Le mode de forage est lié à la nature du terrain. Dans certains terrains, la foration en rotation-percussion est à déconseiller quand ce procédé colmate les fissures. Du fait de la mauvaise tenue ou de l'érodabilité de certains terrains, on doit recourir parfois à un tubage filtrant, pour assurer la pérennité du fonctionnement du drain.

Dans les tunnels anciens qui présentent des suintements en intrados, la réalisation de drains forés peut améliorer la situation en diminuant la charge d'eau sur le revêtement.

Les eaux provenant de ces drains sont collectées par branchement sur des tuyaux noyés (ou non) dans des saignées pratiquées dans le revêtement et débouchant dans le collecteur longitudinal.

2.2.1.3 - Drainage par saignées dans le revêtement (figure 2.2)

Des saignées sont réalisées dans le revêtement à l'intrados au droit des joints entre anneaux ou le long des fissures qui laissent passer l'eau.

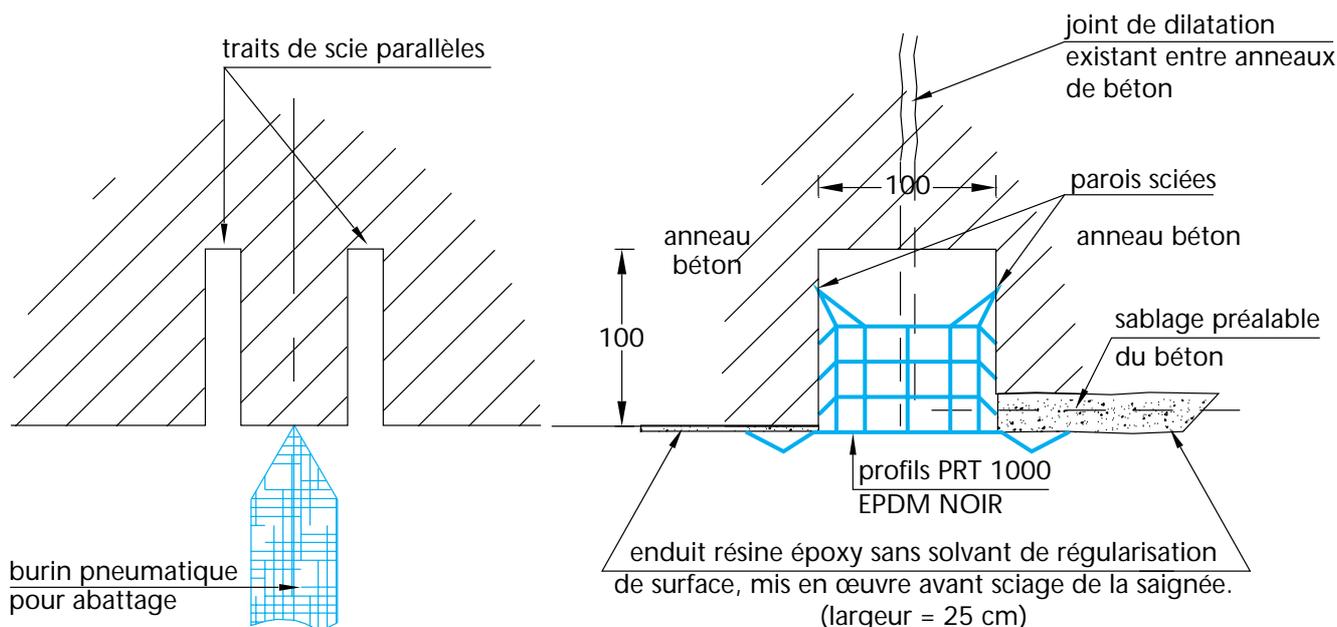
Le système de collecte dans la saignée peut être réalisé par différents moyens (généralement utilisation de profilés spéciaux en demi-circonférence).

Les eaux ainsi canalisées sont envoyées comme pour

le prédrainage vers le collecteur principal situé en radier du tunnel.

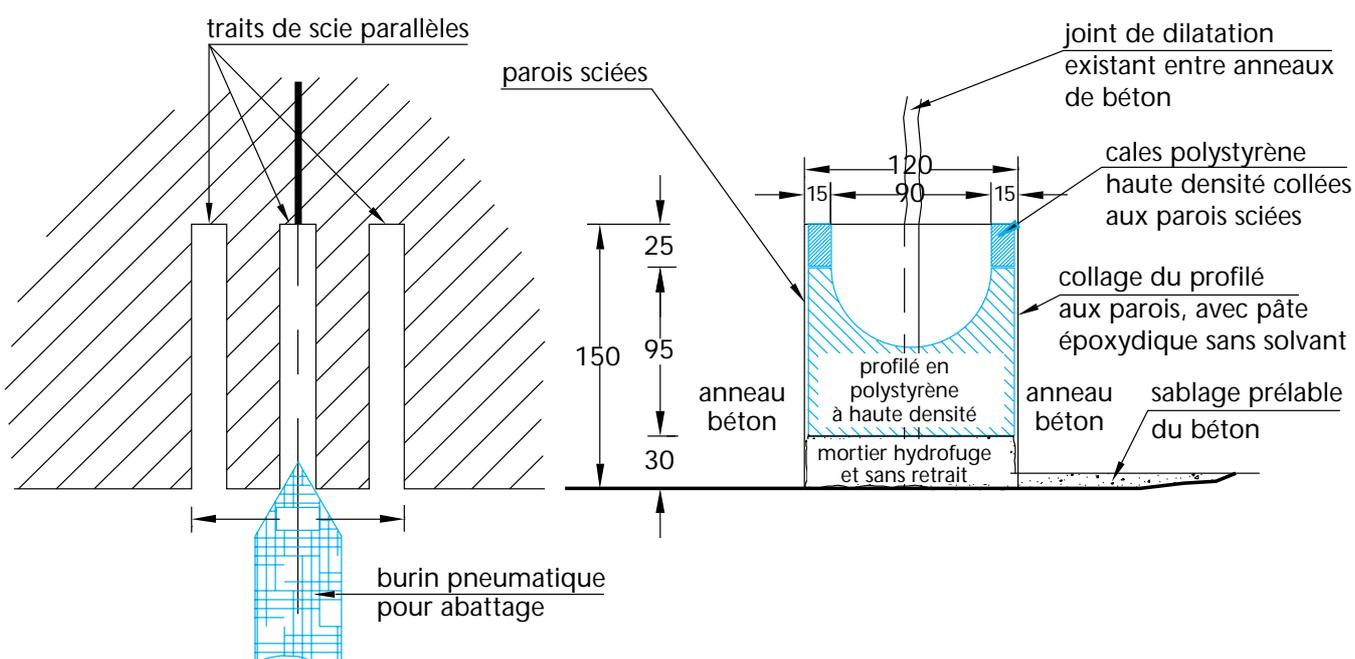
Ce procédé est très utilisé mais comporte plus que les autres deux inconvénients :

- l'eau en circulant dans le béton provoque sa dégradation,
- l'eau en circulant dans le béton peut se charger en chaux et en la redéposant provoquer une obturation du système de drainage.



Nota : le profilé PRT 1000 est préservé de toute chute accidentelle par des barrettes métalliques fixées à la voûte. (acier inox et boulons inox)

▲ Saignées drainantes 100 x 100 en voûte (en section courante de tunnel)



▲ Saignées drainantes 120 x 150 en piedroits (h = 2,50m) avec protection contre le gel

▲ Fig. 2.2

2.2.1.4 - Drainage type parapluie

A l'intrados du terrain encaissant pour les tunnels non revêtus ou à l'intrados de la voûte pour les tunnels revêtus, un élément imperméable (en général tôle galvanisée, mais qui pourrait être constitué de tout autre matériau imperméable et non susceptible de corrosion cf. 3.4.2) est fixé à une certaine distance de la paroi (10 à 20 cm). Des dispositifs du même genre en piédroit ont quelquefois été utilisés à l'étranger.

L'eau de ruissellement circulant dans cet espace libre est reprise pour être conduite dans les caniveaux ou collecteurs. Il faut faire attention au gel, qui risque de surcharger de glace l'élément imperméable et d'amener sa destruction. Une isolation en laine de verre a été utilisée à l'étranger pour éviter le gel.

2.2.2 - Etanchéité propre du revêtement

2.2.2.1 - Cette fonction est importante dans le cas des tunnels immergés (caissons préfabriqués). Il s'agit de structures soit en béton armé (avec traitement spécial des joints de construction et des joints entre caissons), soit en béton précontraint (traitement spécial de joints entre caissons). L'étanchéité est ainsi assurée par le béton et le traitement des joints.

2.2.2.2 - Pour les revêtements en béton coulé en place, il est conseillé de rechercher par une composition bien étudiée du béton et par le soin dans la mise en place, la meilleure compacité possible. C'est une garantie de durée de l'ouvrage. Cela permet également d'obtenir un revêtement étanche dans toute son épaisseur. Néanmoins, il est difficile d'éviter tous les points faibles, en particulier les joints entre anneaux, les reprises de bétonnage (notamment en cas de bétonnage de la section en plusieurs phases), la zone de la clé à cause de la mise en place plus difficile du béton, les points où le revêtement est aminci par suite de la présence de dispositifs divers : carreaux de ventilation, appuis de plafond, etc...

Il convient également d'éviter le plus possible la fissuration du béton par l'emploi judicieux de joints de construction étanches. Cependant, il existe toujours dans la pratique des fissures imprévisibles. Les joints entre anneaux peuvent être l'objet de dispositifs spéciaux d'étanchéité (voir 2.2.5 ci-après).

2.2.2.3 - Les revêtements en voussoirs préfabriqués peuvent être rendus étanches par des dispositions spéciales au droit des joints (grande précision de l'assemblage, produit d'étanchéité qui s'écrase sur toute la surface du joint, boudins d'étanchéité, injections).

2.2.3 - Couches d'étanchéité

Cette méthode d'étanchement consiste à mettre en œuvre au contact (intrados ou extrados) du revêtement un système d'étanchéité imperméable.

2.2.3.1 - Catégories de produits

On distingue actuellement quatre familles principales de produits :

- les feuilles d'étanchéité à base de bitumes polymères en extrados sur structures à remblayer et en intrados sur radier dans le cas de chaussées circulées,
- les feuilles synthétiques en étanchéité extrados,
- les produits polymérisables en étanchéité intrados,
- les enduits hydrofuges en intrados.

2.2.3.2 - Etanchéité extrados (figure 2.3)



▲ **Fig. 2.3 - Étanchement par feuille**

Ce système d'étanchéité ne nécessite pas le traitement des joints ou discontinuités du revêtement car le complexe utilisé (feuilles synthétiques en général en P.V.C. plastifié) est indépendant et souple. Il est appliqué sur le rocher ou le soutènement, généralement avec mise en œuvre d'une couche de béton projeté d'égalisation. Il comporte une feuille de protection extrados et/ou intrados.

Dans le cas d'une étanchéité complète mise en œuvre sur toute la section, le revêtement doit supporter non seulement la poussée éventuelle des terrains, mais aussi la pression hydrostatique totale.

Dans le cas d'une étanchéité partielle mise en œuvre en voûte uniquement, il est souhaitable de l'associer à un drainage (couche entre l'étanchéité et le support, conduit longitudinal en base d'étanchéité, renvois dans les caniveaux) pour éviter toute mise en charge. On n'aura en général, dans ce cas là, aucune venue d'eau après mise en œuvre du revêtement car l'eau s'écoulera plus facilement par le drainage que par les défauts éventuels de l'étanchéité.

2.2.3.3 - Etanchéité intrados

Après réalisation du revêtement, un système d'étanchéité est mis en œuvre à l'intrados. Il y a lieu de vérifier que le film utilisé est apte à résister à la pression hydrostatique éventuelle. (Les prescriptions du fascicule n° 67 titre III prévoient un test en laboratoire à une pression de 1 MPa).

Mis en œuvre après le revêtement, il présente les avantages :

- de n'avoir aucune interaction avec la réalisation du gros œuvre,
- de pouvoir limiter son application aux zones strictement nécessaires compte tenu de l'objectif d'étanchéité recherché et des autres procédés éventuellement déjà mis en œuvre.

Par contre, il nécessite que tous les scellements ultérieurs soient spécialement traités pour rétablir la continuité de l'étanchéité.

Il nécessite le traitement de toutes les discontinuités actives et joints du revêtement.

Généralement, il reste totalement apparent et doit donc accepter les sujétions d'exploitation (possibilité de lavage mécanique, couleur adaptée aux problèmes d'éclairage,...).

2.2.3.4 - Observations

L'étanchéité extradados présente plus de garanties pour la pérennité de l'ouvrage, car elle empêche toute circulation à travers la structure du revêtement. Sa réalisation doit être particulièrement soignée car les réparations ultérieures sont très difficiles et onéreuses (injections de résine derrière le revêtement sans localisation précise de la fuite au niveau de l'étanchéité).

En l'état actuel des expériences, la tenue à long terme de l'étanchéité intrados ne peut pas être considérée comme bonne. Ce type d'étanchéité nécessite des réinterventions.

Le choix d'un produit doit faire l'objet d'essais conformément aux recommandations et prescriptions déjà citées.

2.2.4 - Injections

2-2.4.1 - Injections de remplissage

Ces injections contribuent à l'étanchéité d'un ouvrage. Elles succèdent obligatoirement au bétonnage pour compenser les défauts de mise en place du béton et le retrait qui accompagne sa prise. Leur exécution ne résulte donc pas de considérations d'étanchéité.

2.2.4.2 - Traitement du terrain

Dans le cas de terrains où les venues d'eau se présentent sous une forme diffuse et importante, il peut être nécessaire, soit en phase de creusement, soit après exécution du revêtement si celui-ci n'assure pas

un étanchéité suffisant, de réaliser dans le terrain une auréole dont l'épaisseur sera évaluée suivant les caractéristiques géologiques et géotechniques du terrain. On peut procéder à des injections à partir de la surface (procédé qui entraîne le moins de pertes de coulis et ne ralentit pas l'avancement) ou à partir de la galerie selon des forages disposés en cônes successifs imbriqués.

Les produits à utiliser seront à adapter aux caractéristiques du terrain et en particulier à sa perméabilité (cf. annexe 4.13 de la section 4 "Procédés de creusement et de soutènement").

On ne doit pas compter sur les injections dans le terrain exécutées avant le creusement pour assurer l'étanchéité définitive du tunnel.

2.2.4.3 - Traitement du revêtement dans son épaisseur

Ce procédé est surtout réalisé en réparation par injection de fissures ou de béton poreux. Il peut s'avérer nécessaire en travaux neufs pour l'arrêt des débits d'eau (à titre en général provisoire) afin de pouvoir mettre en œuvre les produits d'étanchéité.

2.2.4.4 - Remarques

Les techniques d'injection sont fiables si les produits choisis sont bien adaptés, mais leur coût élevé limite leur emploi.

Leur pérennité est obtenue par l'emploi de produits dont les caractéristiques à long terme doivent être stables.

2.2.5 - Joints

Les joints entre anneaux (transversaux) ou entre phases de bétonnage (horizontaux) constituent le point faible principal de l'étanchéité.

Les joints entre anneaux peuvent faire l'objet de divers traitements :

- en intrados : drainage renforcé au droit des joints,
- dans le corps du revêtement : mise en œuvre d'un joint d'étanchéité (profilés spéciaux, argile gonflante...),
- à l'extrados, dans une réservation réalisée au moment du bétonnage : mise en œuvre de produits souples d'étanchéité avec ou non bandes de pontage superficielles. Cette technique est la plus délicate et la plus onéreuse : elle offre la possibilité de réparations ultérieures.

Les joints horizontaux entre phases de bétonnage (par exemple joints voûte - piédroits) sont les plus faciles à traiter car n'ayant pas de variations dimensionnelles importantes. Ils peuvent utiliser des produits plus rigides.

Pour ces deux types de joints transversaux et horizontaux (en intrados), il est économiquement souhaitable de prévoir une réservation au moment du bétonnage.

2.3- Choix du procédé d'étanchement

2.3.1 - Conditions hydrauliques

La décision de recourir ou non à telle ou telle méthode d'étanchement doit être précédée d'une analyse des conditions hydrogéologiques du terrain encaissant et de l'influence du tunnel sur ces conditions.

Si le tunnel est situé dans une nappe dont il ne peut assurer le rabattement permanent (traversée de fleuve ou d'estuaire, impossibilité en raison d'inconvénients pour les tiers, nappe alimentée par un débit trop important, profil en long avec point bas, etc...), il est nécessaire de prévoir une étanchéité complète de l'ouvrage (y compris en radier).

Lorsqu'une étanchéité n'est mise en place qu'en voûte il est souvent nécessaire de prévoir un drainage à la base des piédroits et sous la chaussée pour éviter les remontées d'eau intempestives (cf. Section 7 "Assainissement, drainage et réseaux divers").

2.3.2 - Etanchement par drainage

Dans ce cas, l'étanchement n'a pas d'influence sur la structure de l'ouvrage.

Si l'on n'y a pas de revêtement coffré, le drainage est souvent le seul mode d'étanchement envisageable. Il est mis en œuvre par forage et captage des venues d'eau. Sauf en cas d'utilisation d'un drainage type parapluie, il n'a pas d'influence sur la géométrie de l'ouvrage.

Les forages de drainage ont pour effet, soit de faire baisser ou annuler la pression d'eau dans les fissures (pour les tunnels au rocher), soit de rabattre la nappe (pour les tunnels dans les sols). Dans certains cas, on pourra obtenir une étanchéité totale (en voûte) en combinant un drainage par forage et un habillage jouant le rôle de parapluie.

Le prédrainage mis en place derrière le revêtement coffré ou le béton projeté a pour principal rôle de permettre la mise en œuvre correcte du béton. Pour des venues d'eau importantes où les organes de drainage sont largement dimensionnés, son rôle pourra être permanent, sous réserve du maintien de sa pérennité.

La solution de drainage type parapluie n'a pas lieu d'être retenue si on met en œuvre un véritable revêtement (il suffit alors d'interposer une feuille d'étanchéité à l'intrados de ce revêtement cf. 2.3.4). Cette solution est donc essentiellement utilisée en réparation d'ouvrages anciens.

2.3.3 - Etanchement par le revêtement

Dans les cas où l'on choisit de faire jouer au revêtement un rôle d'étanchement il convient :

- d'étudier les caractéristiques du béton et sa mise en

place pour lui donner les meilleures qualités d'imperméabilité,

- de limiter les longueurs des anneaux de bétonnage (maximum 10 m),

- d'éviter ou de traiter les reprises de toute nature,

- d'équiper les joints entre anneaux de bétonnage d'un dispositif d'étanchéité ou de drainage.

Cette solution présente deux avantages :

- l'ensemble des éléments d'étanchement reste visible et donc réparable (joints, fissuration,...),

- le coût reste faible dans la mesure où le traitement des fissures reste limité, ce qui justifie particulièrement son emploi lorsque le revêtement est armé (exemple : voussoirs préfabriqués).

En cas de revêtement en béton non armé, la solution d'étanchement par feuille extradados est préférable (cf. 2.3.4).

2.3.4 - Etanchement par une couche d'étanchéité

La meilleure solution pour la fiabilité et la protection de la structure est la solution d'étanchéité extradados avec béton coffré de revêtement; elle constitue la solution de base pour les tunnels sous la nappe (charge permanente d'eau). Pour les tunnels au rocher, cette solution est également recommandée en général avec drainage en base de piédroits. Compte tenu des difficultés de réparation, elle doit faire l'objet de spécifications et de contrôles très précis. Il convient généralement de prendre des dispositions pour faciliter les réparations éventuellement nécessaires (réservation intrados au niveau des joints dans tous les cas, compartimentage si celui-ci est possible).

La solution d'étanchéité intrados ne présente généralement pas d'intérêt lorsqu'une étanchéité extradados bien protégée peut être mise en œuvre, compte tenu des incertitudes quant à sa pérennité.



Étanchement des tunnels

2.3.5 Tableau récapitulatif

| | Pas de revêtement | Béton projeté de revêtement | Béton coffré non armé (cas général) | Béton coffré armé | Voussoirs (tunnels creusés au tunnelier) |
|---------------------|--|---|-------------------------------------|---|---|
| Tunnel sous nappe | X | X | Étanchéité extrados | Revêtement étanche et traitement des joints ou Étanchéité extrados | Traitement des joints des voussoirs (bandes ou profilés spéciaux) |
| Tunnels hors nappe | Drainage | Drainage ou Étanchéité * intrados ou Étanchéité ** extrados | Étanchéité extrados et drainage | Revêtement étanche et traitement des joints | |
| Tranchées couvertes | X | Traitement des joints | X | Étanchéité extrados ou Revêtement étanche et traitement des joints (hors nappe) | X |
| | Parois préfabriquées en revêtement définitif | | | | |

* Minéralisants et cristallisants de surface

** Nécessite la projection du béton sur le complexe d'étanchéité

Constitution des revêtements

Les matériaux les plus couramment utilisés pour la constitution des revêtements sont :

- le béton coffré non armé pour les tunnels réalisés de manière séquentielle, le revêtement étant alors exécuté indépendamment des opérations d'excavation et de soutènement.
- les voussoirs préfabriqués en béton armé, qui sont utilisés en cas de réalisation d'un tunnel circulaire à l'aide d'un tunnelier. Une variante consiste à employer des voussoirs métalliques ou du béton extrudé.

Le béton projeté est rarement utilisé dans les ouvrages neufs mais contribue beaucoup à la réparation ou à la constitution des revêtements des tunnels anciens.

La maçonnerie de moellons doit être citée pour mémoire, elle n'est plus utilisée dans les ouvrages actuels.

3.1 - Revêtements en béton coffré

3.1.1 - Principales conditions à satisfaire

Le guide du béton coffré en tunnel publié par le CETU en 1983 précise les règles de formulation et les conditions de mise en oeuvre d'un tel béton. Le béton utilisé est le plus souvent de classe B28 à B32.

Le caractère particulier de la réalisation du revêtement des tunnels tient :

- à la nature du béton qui, d'une manière générale, **n'est pas armé**,
- à l'espace confiné que le béton doit remplir complètement en étant mis légèrement en pression,
- à la géométrie de ce volume. D'une part, l'épaisseur du revêtement peut varier très rapidement d'un point à l'autre suivant l'importance des hors profils. D'autre part, cette épaisseur est faible vis-à-vis des autres dimensions d'un plot. Dans les tunnels routiers, l'épaisseur est couramment de l'ordre de 0,40 m pour une surface coffrée de 250 m².

La recherche d'une bonne *maniabilité* du béton frais est nécessaire pour obtenir un bon remplissage du coffrage.

En cas de mise en oeuvre d'une étanchéité par feuille - ce qui est quasiment la règle (cf. chapitre 2) - il faut

veiller à ce que cette feuille soit bien plaquée au soutènement lors du bétonnage et ne conduise pas à des défauts qui peuvent être graves de conséquences pour la pérennité de l'ouvrage : déchirure de la feuille, feuille tendue conduisant à un amincissement local du revêtement, replis de la feuille au sein du béton...

On demande également au béton une bonne *compacité* de façon à résister à l'agressivité du milieu ambiant ; cette compacité facilite notamment l'obtention d'un état de parement apte à recevoir des solutions d'habillage légères, par peinture notamment (cf. 3.4).

Dès lors que l'on accepte une certaine fissuration du béton (cf. section 3 "Conception et dimensionnement"), les *caractéristiques mécaniques* exigées pour assurer la stabilité à long terme de l'ouvrage n'imposent pas de spécifications spécialement contraignantes. On cherche bien sûr à réduire les effets du retrait (cf.3.1.3 ci-après).

La recherche de ces diverses qualités impose des études élaborées, une fabrication du type industriel, c'est-à-dire aussi régulière que possible et l'établissement d'un programme de bétonnage précis afin d'éviter toute improvisation sur le chantier.

Par ailleurs, surtout pour les ouvrages de grandes dimensions, le coffrage des voûtes (figure 3.1) est un outil très particulier qu'il n'est pas toujours facile de maîtriser s'il est mal conçu ou mal utilisé. Même s'il n'est considéré que comme un moyen de l'entreprise, sa conception et sa mise en oeuvre doivent retenir toute l'attention du maître d'oeuvre.



▲ Fig. 3.1 - Coffrage de tunnel

3.1.2 - Cas d'utilisation du béton armé

Les revêtements en béton coffré armé sont tout à fait exceptionnels ; on se contente parfois d'armer localement certaines zones du revêtement lorsque les calculs laissent prévoir des contraintes de traction ou de cisaillement notables.

C'est ainsi que, très généralement, *seuls les ouvrages possédant un radier comportent des armatures* et souvent uniquement à la jonction radier-piédroits (figure 3.2) qui est une zone de fort changement de courbure et de reprise de bétonnage.

L'exécution de béton armé en voûte est toujours délicate, à plus forte raison en présence d'une feuille d'étanchéité. Les anneaux armés complets sont réservés au franchissement d'accidents ou de zones singulières (gonflement, trop faible couverture...).

3.1.3 - Retrait du béton

On distingue :

- le retrait primaire : retrait lié aux réactions d'hydratation (auto-dessiccation et exothermie) à très court terme ;
- le retrait de dessiccation, lié au séchage naturel du béton, pouvant se poursuivre sur une très longue période.

Dans un tunnel, la forme du revêtement et le contact entre terrain et revêtement empêchent la déformation de retrait de s'effectuer librement. Le séchage est plus important à l'intrados, d'où une déformation différente entre extrados et intrados. Ces phénomènes provoquent des contraintes internes et des fissures de retrait.

Il n'est pas aisé de connaître la partie des contraintes de retrait dissipée par l'ouverture des fissures et les déformations globales de la voûte.

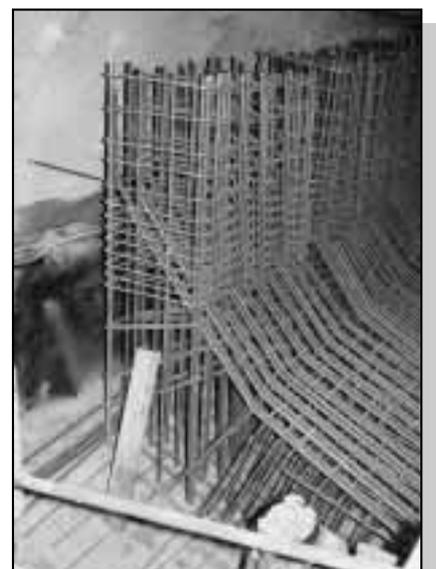
Le retrait est certainement accentué dans les tunnels routiers modernes du fait de l'accélération du séchage liée à la ventilation et de l'étanchement par une feuille d'étanchéité placée à l'extrados du revêtement. Cette feuille constitue en outre une surface de décollement qui facilite le retrait.

Les règles usuelles de calcul du retrait conduisent à des valeurs de l'ordre de 250µm/m au bout de cinq ans pour des revêtements de 40 à 50 centimètres d'épaisseur.

Le bétonnage du revêtement par plots d'une dizaine de mètres de longueur ne permet généralement pas d'éviter l'apparition de fissures de retrait intermédiaires. Une fissuration en clé de voûte se produit également fréquemment.



Armatures de radier



Détail de la jonction radier-piédroit

▲ Fig. 3.2

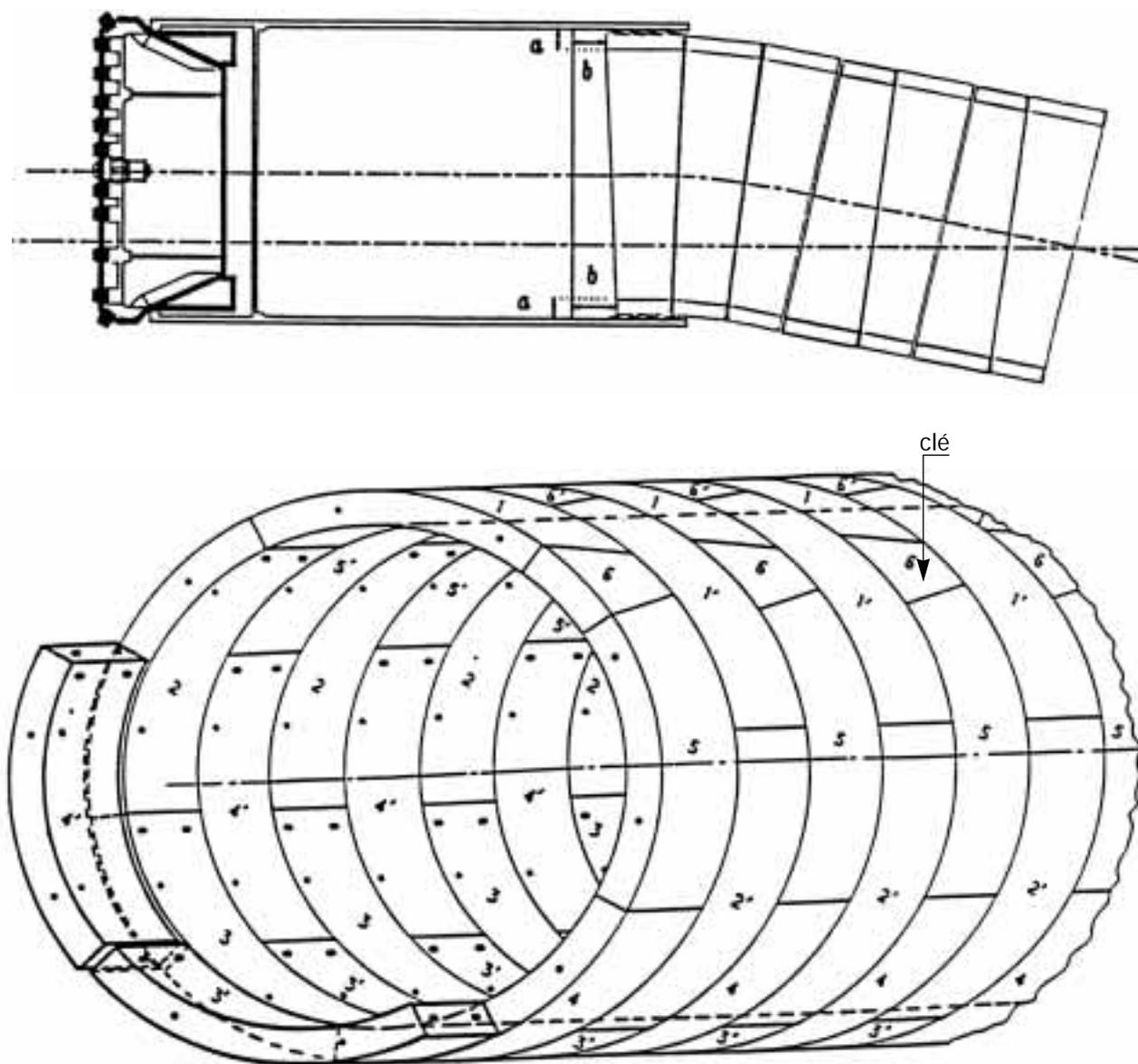
3.2 - Revêtement des tunnels réalisés au tunnelier

3.2.1 - Utilisation de voussoirs

On utilise généralement des voussoirs préfabriqués en béton armé de 30 à 40 centimètres d'épaisseur, boulonnés entre eux, avec joints d'étanchéité entre

voussoirs d'un même anneau et anneaux successifs. Dans la solution dite "à voussoirs universels", ces anneaux sont légèrement pincés parallèlement à l'axe du tunnel (c'est-à-dire que leur longueur - de l'ordre de 1 à 2 mètres - est légèrement variable de façon à permettre de suivre le tracé imposé au tunnels dans toutes les directions, par rotation de la position des voussoirs d'un anneau au suivant (figure 3.3).

Le vide subsistant entre voussoirs et terrain doit bien sûr être soigneusement rempli par un produit de bourrage, dont la composition est fonction des objectifs fixés ; il peut s'agir d'un coulis actif (faisant prise) ou d'un coulis "inerte".



▲ Fig. 3.3

Voussoirs "universels"

Dans certains cas on choisit de placer un deuxième anneau de revêtement à l'intérieur de l'anneau en voussoirs, ce qui permet de renforcer l'étanchéité et facilite surtout la réalisation des aménagements intérieurs du tunnel (cf. section 6 "Génie civil lié aux équipements et à l'exploitation").

L'utilisation de voussoirs métalliques est également possible.

3.2.2 - Béton extrudé

Le béton extrudé armé de fibres d'acier a notamment été utilisé sur le chantier de la ligne D du métro de LYON pour réaliser en continu derrière le bouclier un anneau assurant le soutènement de l'excavation. Cet anneau a ensuite été doublé par un anneau de revêtement intérieur.

L'utilisation du béton extrudé pour réaliser directement un revêtement définitif étanche dans un tunnel n'apparaît pas actuellement comme une solution fiable et économique.

3.3 - Autres types de revêtement

3.3.1 - Béton projeté

Le revêtement définitif des tunnels neufs en béton projeté ne constitue une solution susceptible d'être retenue que dans des cas particuliers où ne se pose aucun problème lié à la stabilité de l'ouvrage, à son étanchéité ou à son confort d'utilisation. Pour les tunnels routiers, il ne peut donc s'agir que d'ouvrages assez peu circulés, réalisés dans un rocher de bonne qualité.

En revanche le béton projeté est largement utilisé lors des travaux de rénovation des tunnels anciens :

- soit en constituant des coques armées adhérentes au support (maçonnerie, rocher)
- soit pour la réalisation de coques minces non adhérentes, supportant une feuille d'étanchéité (cf. 3.4).

On peut signaler des tentatives d'amélioration du rendu de surface du béton projeté par lissage intégré au chantier de projection.

3.3.2 - Voûtes actives

Un procédé, connu sous le nom de procédé JACOBSON, est particulièrement adapté pour la réalisation de grandes ouvertures ; il consiste à réaliser une voûte constituée d'éléments d'arcs juxtaposés, eux-

mêmes formés de voussoirs préfabriqués, mis en place par un portique de pose et mis en compression par l'intermédiaire d'une clef de voûte munie de vérins. Cette voûte peut être mise en place au plus près du front de taille (figure 3.4).



▲ Fig. 3.4- Exemple de pose d'une voûte active (Station Chatelet de Meteor)

3.4 - Habillage des parois des tunnels

3.4.1 - Définition et rôle des habillages

On considère, comme "habillages" des parois de tunnels, des structures légères, ou simplement des peintures, n'ayant aucun rôle de soutènement du tunnel comparable à celui d'un revêtement en béton coffré.

Ces habillages ont pour rôle :

3.4.1.1. Dans les tunnels non revêtus (mais stabilisés),

- de garantir la sécurité de l'utilisateur contre les chutes de débris rocheux et de stalactites, voire d'un bloc isolé,
- d'assurer l'étanchement du tunnel, ou protéger l'étanchéité placée en intrados de celui-ci,
- d'améliorer le confort.

3.4.1.2 - Dans les tunnels revêtus mais non étanchés,

- d'assurer l'étanchement du tunnel et éviter les chutes de stalactites,
- d'améliorer le confort.

3.4.1.3 - Dans les tunnels revêtus et étanchés,

- d'améliorer le confort (et de faciliter le nettoyage des parois).

L'amélioration de sécurité est apportée par des habillages consistant à placer en voûte ou sur la totalité de l'intrados du tunnel des structures légères de type parapluie telles que :

- coques minces en béton projeté,
- tôles métalliques cintrées et assemblées (ou autres matériaux).

Ces habillages peuvent supporter un dispositif d'étanchéité.

Il faut être conscient du fait que la présence de l'habillage interdit l'examen des parois du tunnel.

Le confort, suivant le genre de tunnel, peut être nettement amélioré grâce à la mise en place d'habillages en piédroits, destinés à :

- augmenter la luminosité créée par l'éclairage,
- faire découvrir par anticipation la géométrie du tunnel, par création d'un guidage latéral dynamique,
- abaisser le niveau sonore régnant en tunnel et aux entrées.

Ces habillages vont des traitements de surface des piédroits :

- peintures, carrelages, etc...

aux bardages en tôles (métalliques ou autres), panneaux préfabriqués, revêtus et accrochés aux piédroits.

L'insonorisation est assurée par panneaux spéciaux composites disposés en piédroits et en plafond de tunnel.

3.4.2 - Principaux habillages en voûtes

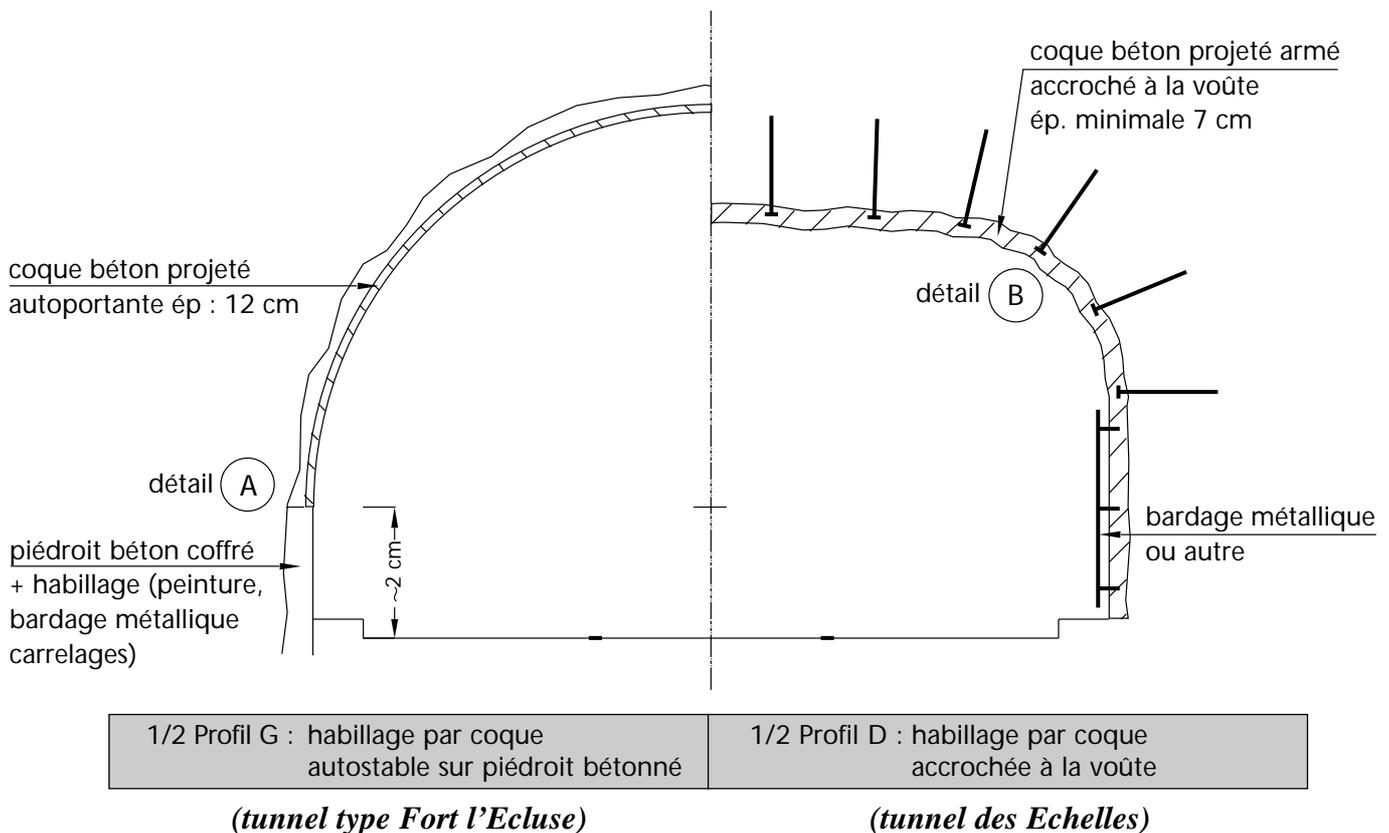
3.4.2.1 - Coques minces en béton

On en distingue deux sortes :

- les coques autostables non accrochées à la voûte et reposant sur des piédroits bétonnés (figure 3.5 demi-profil G).

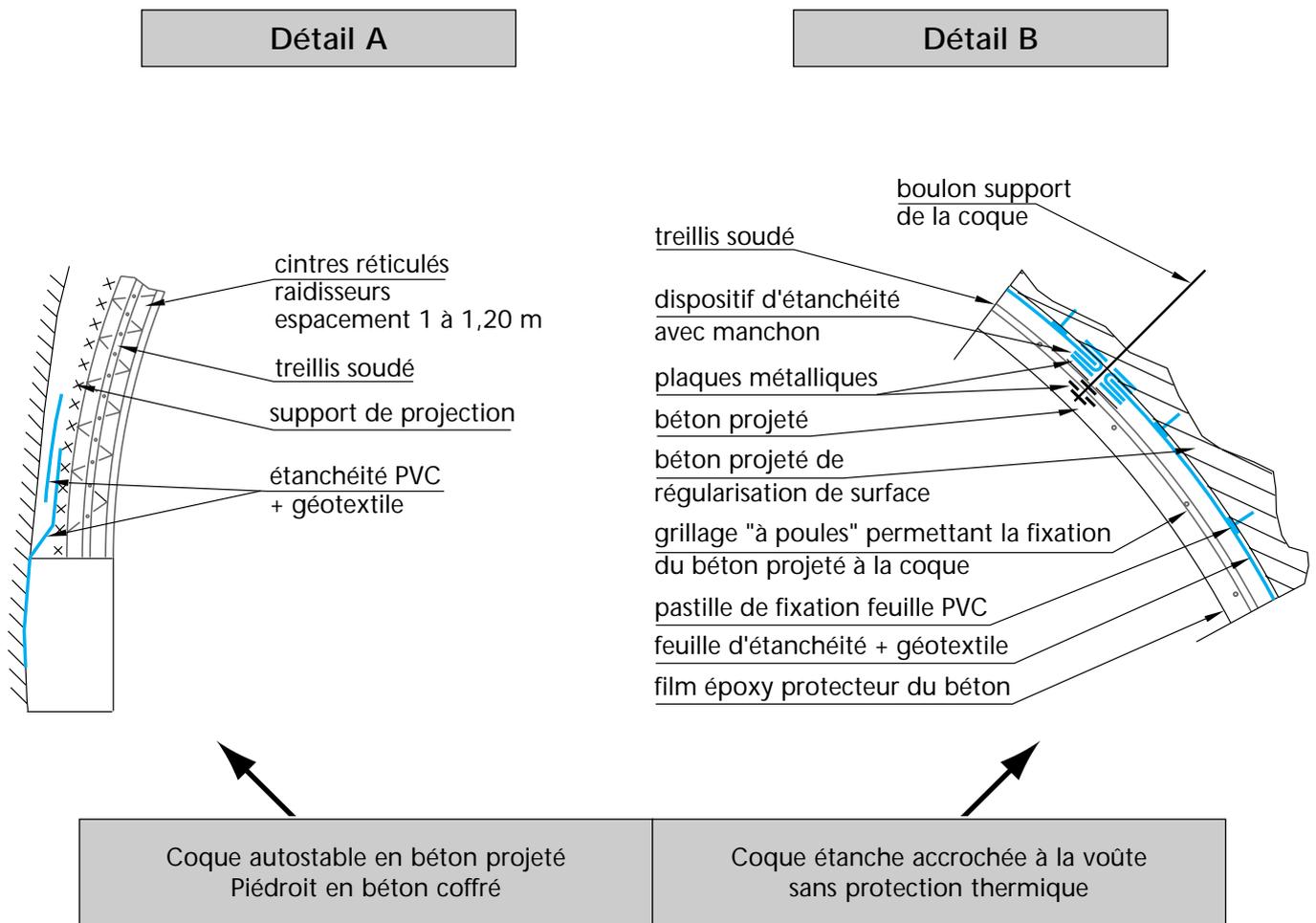
- les coques accrochées à la voûte (figure 3.5 demi-profil D), lorsque la section transversale du tunnel est irrégulière et n'autorise pas facilement un alésage circulaire ou lorsqu'on ne dispose que d'une faible marge par rapport à l'intrados d'un revêtement existant. L'un des problèmes à régler dans ce cas est celui du percement de l'étanchéité par les ancrages.

Le recours à une coque mince en béton constitue souvent une solution intéressante en cas de remise en état de tunnel ancien.



▲ Fig. 3.5 a

Habillage par coque mince en béton projeté



▲ *Fig. 3.5 b*

3.4.2.2 - Habillages de type parapluie en tôles (figure 3.6)

L'habillage classique est réalisé en tôles ondulées d'acier galvanisé, précintrées.

Les points faibles sont généralement les points d'accrochage qui doivent faire l'objet d'une surveillance régulière. La durée de vie de ce type de structure est de l'ordre de 20 ans, fonction de l'agressivité du milieu ambiant.

L'acier galvanisé peut être remplacé par l'aluminium, les alliages d'aluminium ou l'acier inox.

Sont à l'étude des structures de type parapluie à base de résines composites.

3.4.3 - Principaux habillages en piédroits

3.4.3.1 - Bardages (figure 3.6)

Les bardages peuvent être :

- métalliques (tôles émaillées),
- en aluminium et alliages d'aluminium,
- en acier inox,
- en matériaux composites.

Ces bardages doivent être conçus de façon à pouvoir être facilement remplacés en cas de détérioration. Ils doivent résister au souffle créé par le passage des véhicules. Ils doivent être protégés par un trottoir suffisamment large ou une bordure haute. Il convient de disposer d'un stock de panneaux de rechange pour effectuer les remplacements à la demande.

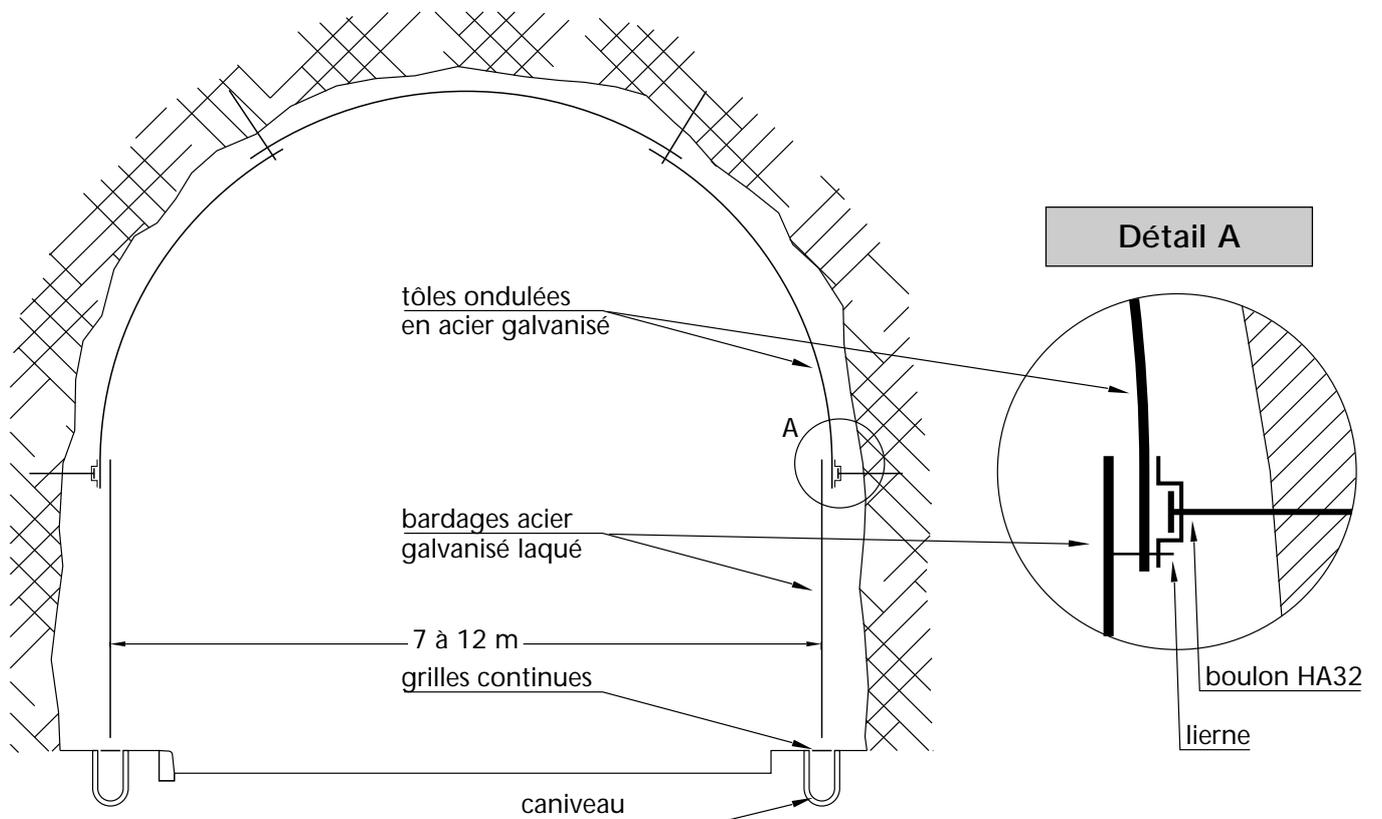
Compte tenu des sujétions d'entretien qu'elle entraîne, la solution d'habillage par bardages n'est à envisager que pour des tunnels très importants (tunnels transfrontaliers, tunnels urbains très circulés ...) où l'on veut soigner tout particulièrement l'esthétique et le confort.



Habillage par peinture



Habillage par bardage et parapluie en tôles



▲ Fig. 3.6

*Habillage par tôles parapluie en voûte
et bardages métalliques en piédroits
(Tunnel du Chat - Savoie)*

3.4.3.2 - Peintures

Elles doivent répondre aux spécifications de l'annexe T.38.1 du fascicule n°65 du C.C.T.G. et des notes d'information techniques du L.C.P.C. relatives à la mise en peinture des bétons du Génie Civil (préparation, approvisionnements, tests, essais).

La durabilité exigée pour les peintures est de 10 ans avec une cadence de 10 nettoyages par an.

La mise en peinture constitue généralement une solution satisfaisante et suffisante pour les tunnels neufs, comportant un revêtement en béton de bonne qualité.

3.4.3.3 - Carrelages

Leur coût n'est plus prohibitif du fait de la possibilité donnée par la préfabrication de créer des panneaux carrelés qu'il suffit de fixer aux parois comme un bardage.

La qualité des carrelages doit faire l'objet d'essais normalisés et d'agrément du L.C.P.C. ou autres organismes.

La durée de vie des carrelages peut être supérieure à 50 ans.

Observation : les carreaux collés en voûte sont totalement à proscrire en raison du risque de chute sur la chaussée.

3.4.3.4 - Panneaux anti-bruit

Ces panneaux d'épaisseur variant de 5 à 10 cm, sont constitués d'absorbeurs acoustiques (laine de verre, céramiques) enserrés entre tôles en acier galvanisé à 600 g/m² par face, ou entre tôles inox d'excellente qualité.

Ces panneaux placés généralement en piédroits mais également en plafond du tunnel, ont le double rôle d'assurer confort lumineux et confort acoustique.

3.4.4 - Qualités requises par les habillages

- incombustibilité (classe M0 ou M1),
- non émission de vapeurs toxiques en cas d'incendie,
- facilement lavables sans perte excessive de luminosité sous l'action des lessives, rouleaux nettoyeurs, jets d'eau à 100 bars,
- difficilement attaquables par les gaz d'échappement, antigels, humidité, produits détergents, anhydride sulfureux...,
- panneaux verticaux : résister à une pression uniforme de 0,3 Mpa et à des charges concentrées de 1 kN,
- panneaux placés en voûte : résister à une pression uniforme de 0,3 Mpa et à des charges concentrées variant de 1 à 5 kN en extradados,
- offrir une bonne flexibilité,
- être dotés d'un système de fixation aux parois permettant un démontage et un remontage rapide des éléments,
- ne pas présenter de bords tranchants et ne pas donner lieu en cas de chocs à des morceaux tranchants ou pointus,
- toutes les pièces nécessaires à la fixation des habillages doivent présenter la même résistance à la corrosion (éviter les phénomènes électrolytiques dus aux contacts de métaux divers),
- offrir une bonne stabilité aux vibrations engendrées par la circulation (emploi de rondelles néoprène ou autres),
- facilité de manipulation de chaque éléments par 2 hommes ou par un matériel spécialement conçu à cet effet (ce qui garantit les remplacements à la demande à partir du moment où l'on prend la précaution de disposer d'un stock d'éléments de rechange).

Surveillance à long terme

4.1 - Objectifs

Pour la surveillance des ouvrages en service le cadre réglementaire prévoit un certain nombre de dispositions présentées dans deux documents :

- "L'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art" datée du 19 Octobre 1979, modifiée le 26 Décembre 1995.
- Le fascicule 40 "Tunnels - Tranchées couvertes - Galeries de protection" de novembre 1980.

Ces dispositions visent bien entendu à inciter l'exploitant à surveiller minutieusement son ouvrage pour être en mesure de détecter suffisamment tôt toute anomalie ou dérive dans le comportement prévu, susceptible d'induire des risques sérieux pour les usagers ou pour la pérennité de l'ouvrage.

4.2 - Moyens

4.2.1 - Inspection

Le contenu et la périodicité des inspections sont décrits dans les documents rappelés ci-dessus.

Les visites annuelles comportent :

- un examen visuel,
- la vérification du fonctionnement des dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux (et leur entretien autant que nécessaire),
- la vérification des équipements.

Les inspections détaillées périodiques sont effectuées par des spécialistes et conduisent à recenser les évolutions de l'état des éléments du tunnel accessibles à l'examen ; elles comportent s'il y a lieu des investiga-

tions complémentaires, notamment en cas de détection d'anomalies (reconnaissance par sondages, géophysique...). Elles peuvent s'appuyer également sur les résultats d'auscultation de l'ouvrage (cf. 4.2.2 ci-après).

L'ensemble des éléments recueillis lors des visites et inspection doit être consigné dans le *dossier d'ouvrage*.

4.2.2. - Auscultation

Le prolongement des mesures faites durant le chantier peut parfaitement s'inscrire dans le dispositif d'auscultation et même en constituer un élément fondamental puisqu'une telle option permet de situer la surveillance à long terme dans la continuité de la vie de l'ouvrage.

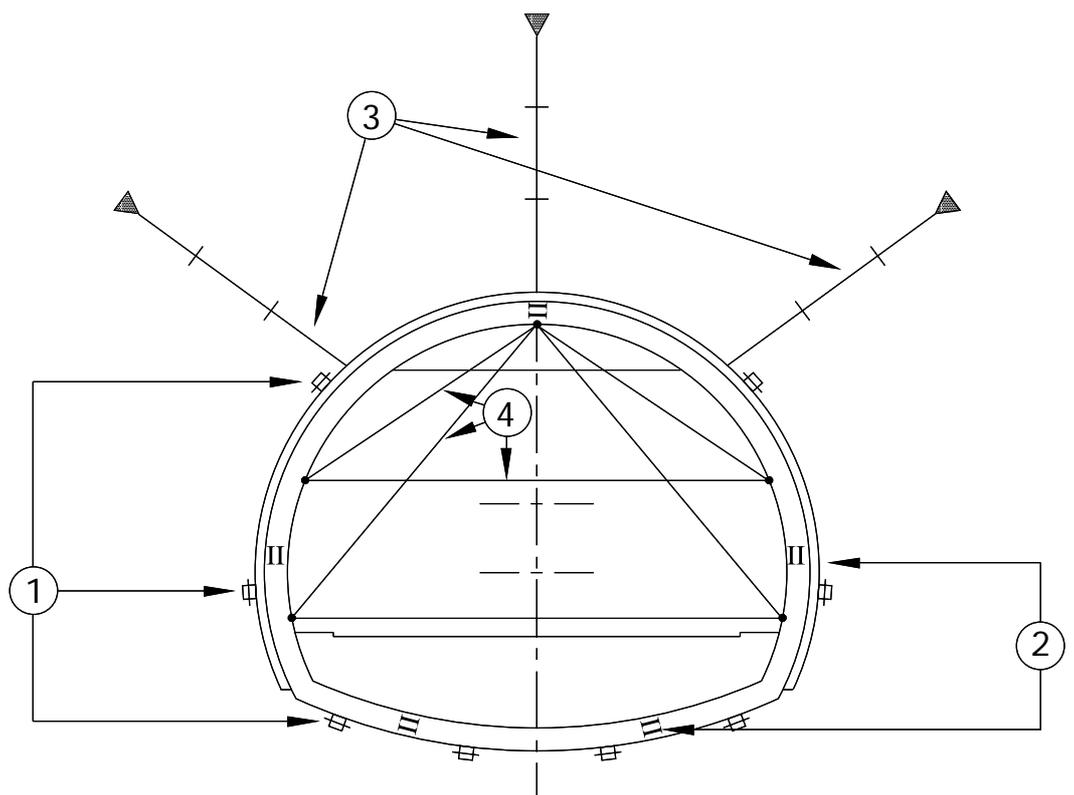
En conséquence les moyens d'auscultation mis en oeuvre sont quasi identiques à ceux mis en place lors des travaux (cf. section 4, chapitre 3 = auscultation pendant les travaux) avec principalement (exemple figure 4.1) :

- nivellement
- convergence relative au moyen de plots fixés à l'intrados du revêtement cette fois,
- convergence absolue,
- cellules de pression totale,
- extensomètres à corde vibrante,
- cellules piézométriques s'il y a lieu.

La connaissance des températures à l'intrados et à l'extrados du revêtement est généralement utile à l'interprétation des mesures.

Le plan de surveillance définit très précisément pour chacun des paramètres mesurés :

- la périodicité des mesures,
- le mode opératoire,
- la présentation des résultats (support, format, etc...),
- les seuils et les niveaux d'alerte,
- les procédures à suivre en cas d'atteinte ou de dépassement des seuils d'alerte.



- | | |
|---|---|
| ① mesure de pression cellules de pression totale | ③ convergence absolue extensomètres à 3 capteurs |
| ② mesure de déformations du béton extensomètres à cordes vibrantes | ④ convergence relative |

▲ Fig. 4.1

Exemple de section de mesure

4.3 - Intérêt de l'auscultation des tunnels en service

Dès lors qu'ils ont été conçus selon les règles de l'art (cf. chapitre 4 de la section 3 "Conception et dimensionnement"), les revêtements de tunnels se comportent très généralement de façon satisfaisante et assurent une bonne stabilité de l'ouvrage au cours du temps par leur aptitude à travailler en voûte et de manière interactive avec le terrain.

L'intérêt d'une auscultation à moyen et long terme se présente donc surtout dans les cas suivants :

- présomption d'effets différés importants , conduisant à un chargement inhabituel du revêtement (gonflement par exemple),
- sections d'ouvrages s'écartant par leur taille ou leur forme des sections habituelles,
- apparition d'anomalies après mise en service de l'ouvrage.

L'auscultation reste également utile pour améliorer la connaissance du comportement des revêtements de tunnels et notamment celle de l'incidence du retrait du béton et des reports de charge du soutènement sur le revêtement. Il est fondamental pour cela de disposer de mesures fiables sur une durée suffisante, c'est-à-dire au moins 10 à 20 ans.

Bibliographie

- ◆ C.C.T.G. Fascicule n° 67 - Titre III "Étanchéité des ouvrages souterrains" (approuvé par décret n° 92-72 du 16 Janvier 1992).

- ◆ Recommandations de l'Association Française des Travaux en Souterrain (publiées dans la revue "Tunnels et Ouvrages Souterrains").
 - Étanchéité des ouvrages en souterrain (n° spécial 11/84)
 - Travaux d'entretien et de réparation (n° spécial 11/84)
 - Réparations d'étanchéité (n° spécial 5/88)
 - Travaux d'injection pour ouvrages souterrains (n° spécial 5/88)
 - Réparation des ouvrages souterrains en France par film polymérique et /ou par drainage à l'aide de complexe synthétique (n° 112. 7-8/92)
 - Étanchéité des ouvrages souterrains - Matériaux conformes au fascicule 67 titre III du C.C.T.G. - Mai 1997 (n° 142. 7-8/97)
 - L'utilisation et la mise en oeuvre d'un compartimentage associé à un dispositif d'étanchéité par membrane synthétique (n° 130. 7-8/95)
 - Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus (n° 131. 9-10/95)
 - L'étanchéité des voussoirs préfabriqués en béton (n°132. 11-12/95)
 - L'emploi de rondelles PVC pour la fixation des membranes d'étanchéité en tunnel (n° 138. 11-12/1996).
 - La conception, le dimensionnement et l'exécution des revêtements en voussoirs préfabriqués en béton armé installés à l'arrière d'un tunnelier (n°147. 5-6/98)

- ◆ Guide du béton coffré en tunnel (CETU Juin 1983)

- ◆ Guide pour la surveillance, l'entretien, la conservation des tunnels routiers (CETU - Mars 1998)

- ◆ Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (19 octobre 1979 modifiée le 26-12-95)
 - Fascicule 01 "Dossiers d'ouvrages"
 - Fascicule 40 "Tunnels - Tranchées couvertes - Galeries de protection"

- ◆ Les méthodes visuelles de surveillance et d'investigation (C. CHOQUET) Stage ENPC "Pathologie et réparation des tunnels anciens". Lyon 11 au 13 Octobre 1994.

- ◆ Étanchement des tunnels anciens. Protection du complexe étanchéité-isolation par une coque mince en béton projeté armé (A.JULIEN). Tunnels et Ouvrages Souterrains n° 133 (1-2/96)