

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et de Dynamique des Structures

Mémoire de Master pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

Entretien de l'étanchéité des ouvrages souterrains

Mohamed Fethi MERZOUG

Présenté et soutenu publiquement le 22 Juin 2016 devant le jury composé de :

| | | | | |
|-------------|------|----------------|------------|-----|
| Président | Mme. | R.KETTAB | Professeur | ENP |
| Rapporteurs | Mme. | D.CHERID | M.A.A | ENP |
| | Mme. | H. MOHABEDDINE | M.A.A | ENP |
| Examineurs | M. | S.LAKEHAL | M.A.A | ENP |
| | M. | M.DEMIDEM | M.A.A | ENP |

ENP 2016

ملخص

الموضوع : صيانة مقاومة الماء لنفق

منذ القدم, اهتم الإنسان بحماية بناياته ضد فعل الماء, و الأنفاق هي البنايات الأكثر تضررا من هجوم الماء.

سنهتم في هذا الماستر بدراسة تسرب المياه في نفق جديد أو قديم, عبر تطوير مختلف طرق مقاومة الماء و وسائل مقاومة الماء الأكثر استعمالا للأنفاق الجديدة و كذلك تقنية تصليح الوقاية من الماء تحت الأرض عبر الإدخال.

الكلمات المفتاحية: مقاومة الماء, تجفيف, نفق.

Abstract

Subject : Upkeep waterproofing of a tunnel

Always, man was preoccupied by the protection of his constructions against the action of waters, and tunnels are the constructions the most vulnerable to the waters attack.

We will be interested in this master in the study of waterproofing of a tunnel new or ancient, by developing the different method of waterproofing and products of waterproofing the most fluently used in the new tunnels together with the technique of reparation of waterproofing underground by injection.

Keys words : waterproofing, drainage, tunnel.

Résumé

Sujet : Entretien de l'étanchéité d'un tunnel

Depuis toujours, l'homme s'est préoccupé de la protection de ses constructions contre l'action des eaux, et les tunnels sont les constructions les plus vulnérables à l'attaque des eaux.

On s'intéressera dans ce master à l'étude de l'étanchement d'un tunnel neuf ou ancien, en développant les différents procédés d'étanchéité et les produits d'étanchéité les plus couramment utilisés pour les tunnels neufs ainsi que la technique de réparation d'étanchéité en souterrain par injection.

Mots clés : étanchéité, drainage, tunnel.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

A mon père, mon premier encadrant, depuis ma naissance;

A ma très chère mère: qu'elle trouve ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de ses sacrifices et ses prières pour moi;

A mon frère et ma sœur: à qui je souhaite beaucoup de réussite et de Bonheur;

A tous mes amis qui me sont chers, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment : qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments les plus dévoués et mes vœux les plus sincères;

Que dieu le tout puissant vous préserve tous et vous procure sagesse et Bonheur.

MERZOUG Mohamed Fethi

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu tout puissant qui m'a donné force et volonté afin d'achever cette thèse et je lui rends grâce.

Je remercie mes très chers parents, la source de toutes mes forces pour leur soutien et leur patience.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes chères promotrices M^{me} CHERID et M^{me} MOHABEDDINE. Je les remercie de m'avoir encadré, orientés, aidés et conseillés.

Je présente mes chaleureux remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant ma thèse.

MERZOUG Mohamed Fethi

Table des matières

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale..... | 8 |
| Chapitre I Généralités..... | 9 |
| I. Introduction | 10 |
| II. Nécessité de l'étanchement des tunnels | 10 |
| III. Conclusion..... | 14 |
| Chapitre II L'étanchement..... | 15 |
| I. Introduction | 16 |
| II. Principes généraux d'étanchement..... | 16 |
| III. Procédés d'étanchement..... | 18 |
| IV. Choix du procédé d'étanchement..... | 24 |
| V. Conclusion..... | 27 |
| Chapitre III Produit d'étanchement..... | 28 |
| I. Introduction | 29 |
| II. Géomembranes synthétiques..... | 29 |
| III. Conclusion..... | 45 |
| Chapitre IV Les Réparations d'étanchéité en souterrain par injection..... | 46 |
| I. Introduction | 47 |
| II. Principe de l'injection | 48 |
| III. Produits et solutions possibles..... | 49 |
| IV. Mise en œuvre | 51 |
| V. Recommandations | 52 |
| VI. Contraintes de qualité..... | 53 |
| VII. Conclusion..... | 53 |
| Conclusion générale | 55 |
| Références bibliographiques | 56 |

Liste des figures

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1 Zone humide. | 11 |
| Figure I-2 Stalactites de glace en voûte. | 11 |
| Figure I-3 Taches sur le revêtement. | 12 |
| Figure I-4 Érosion mécanique et corrosion du ferrailage. | 12 |
| Figure I-5 Conduit avec une réduction importante par formation de glace. | 13 |
| Figure I-6 Cas du drainage du massif du tunnel de Saint Germain - Suisse. | 14 |
| Figure II-1 Principaux types d'étanchement. | 17 |
| Figure II-2 Saignées drainantes 120 x 150 en piédroits (h = 2,50m) avec protection contre le gel. | 20 |
| Figure II-3 Etanchement par feuille. | 22 |
| Figure III-1 Application d'un géomembrane synthétique "protection extradors". | 29 |
| Figure III-2 Géotextiles. | 30 |
| Figure III-3 Géocomposite de protection et drainage. | 36 |
| Figure III-4 la composition type d'un complexe comprenant des membranes à base de bitume | 37 |
| Figure III-5 Système d'étanchéité à base d'asphalte coulé. | 38 |
| Figure III-6 Systèmes bitumineux soudés à chaud. | 40 |
| Figure III-7 Systèmes bitumineux adhésifs à froid. | 43 |
| Figure III-8 Application du béton drainant. | 45 |
| Figure IV-1 Réparation de l'étanchéité par injection (cas d'une station métro). | 47 |
| Figure IV-2 Principe de la réparation par injection. | 48 |
| Figure IV-3 Coulis à base de ciment. | 50 |
| Figure IV-4 Injection selon PV = constant. | 53 |

Introduction Générale

Introduction générale

Les tunnels 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.

Dans ce master, composé de 4 chapitres nous allons dans un premier temps parler de la nécessité de l'étanchement d'un tunnel.

Le deuxième chapitre portera sur les principes généraux de l'étanchement ainsi que ses procédés et les critères de leur choix.

Dans le troisième chapitre on abordera les produits d'étanchement où on détaillera pour chaque type, ses applications, fonction et modes d'emplois.

En ce qui concerne le quatrième et dernier chapitre, il va parler d'une des techniques de réparation d'étanchéité des ouvrages souterrains anciens, il s'agit de la technique d'injection.

Enfin, nous finirons par une conclusion générale.

Chapitre I: Généralités

I. Introduction

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.

L'étanchéité et le drainage doivent être réalisés d'une manière continue et avec le plus grand soin.

II. Nécessité de l'étanchement des tunnels

La qualité de l'étanchement conditionne directement la qualité du service rendu à l'utilisateur ainsi que la durée de vie de l'ouvrage, la nécessité de l'étanchement est dictée donc par les raisons suivantes [4] :

II.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 :

Ces ruissellements d'eau peuvent entraîner la présence permanente d'eau au niveau des rails, augmentant les difficultés du fait de la mauvaise adhérence des du véhicule sur les rails, et de la dégradation progressive de la chaussée.



Figure I-1 Zone humide.

- **Formation de glace**

En cas de venue d'eau et de gel, la formation de glace en voûte (stalactites risquant de tomber sur les véhicules) ou en Chaussée représente une source de danger supplémentaire.



Figure I-2 Stalactites de glace en voûte.

- **Taches sur la voûte et les piédroits**

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'œil et est source d'inconfort pour l'utilisateur.



Figure I-3Taches sur le revêtement.

II.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.



Figure I-4Érosion mécanique et corrosion du ferrailage.

- 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.



Figure I-5 Conduit avec une réduction importante par formation de glace.

Ces venues provoquent aussi 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.

II.3. Drainage du massif

Les venues d'eau non maîtrisées peuvent conduire à un rebattement de la nappe phréatique, provoquant ainsi des tassements du terrain qui peuvent produire dommages dans les ouvrages de la surface.



Figure I-6Cas du drainage du massif du tunnel de Saint Germain - Suisse.

II.4. 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 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 percolant à une valeur jugée compatible avec la pérennité de l'ouvrage et les conditions d'exploitation.

III. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de constater les différents problèmes causés par l'infiltration des eaux dans un ouvrage souterrain d'où la nécessité de l'étanchéité de ces derniers pour assurer une durabilité pérenne de l'ouvrage et une bonne résistance vis-à-vis de l'eau.

Chapitre II

L'étanchement

I. Introduction

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.

II. Principes généraux d'étanchement

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.

II.1. Trois principes d'étanchement

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

- Constituer sur son cheminement une barrière étanche (béton de revêtement éventuellement traité, 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.

- 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.

- 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.

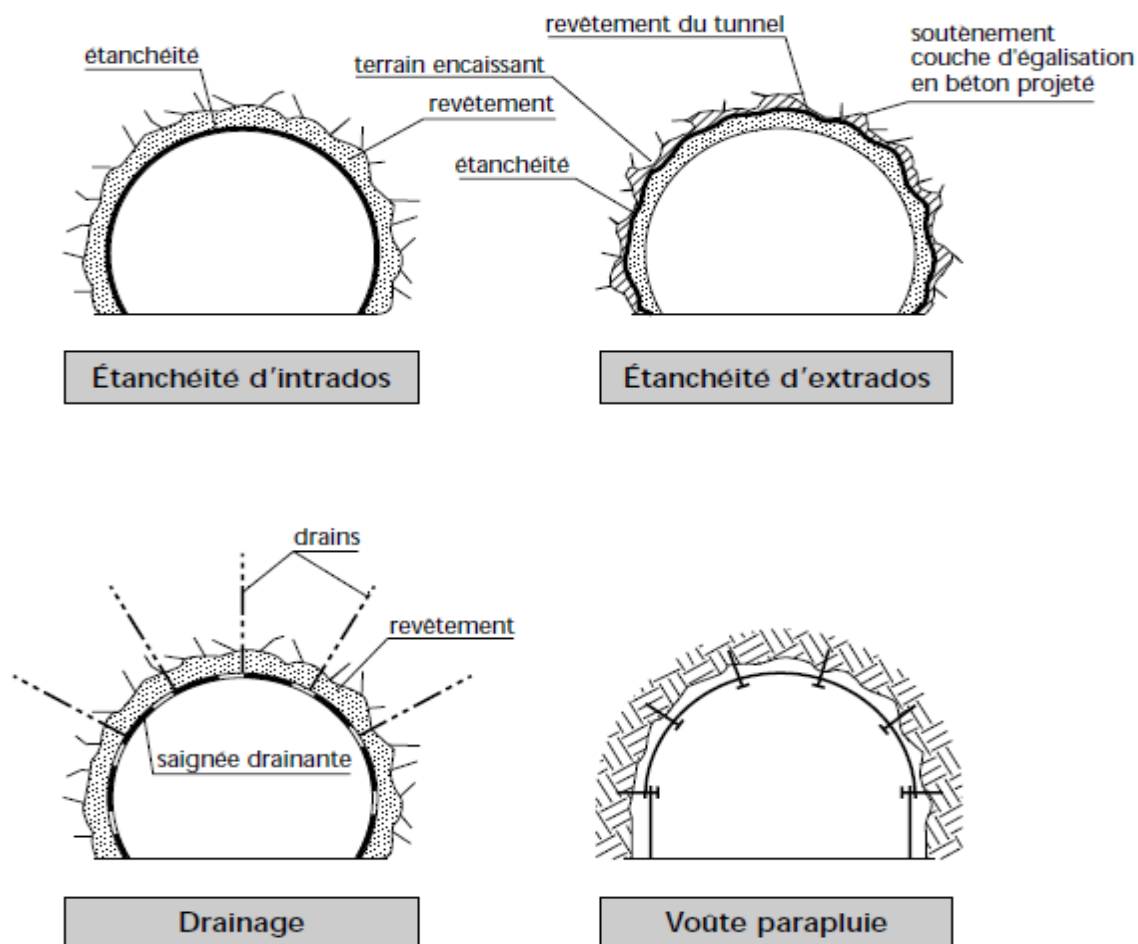


Figure 0-1 Principaux types d'étanchement.

II.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...) [4].

III. Procédés d'étanchement

III.1. Drainage

Il est traité dans ce chapitre des dispositifs permanents, utilisables pour les tunnels neufs ou déjà en exploitation.

- **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.

NB : 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

- **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.

Drainage par saignées dans le revêtement

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.

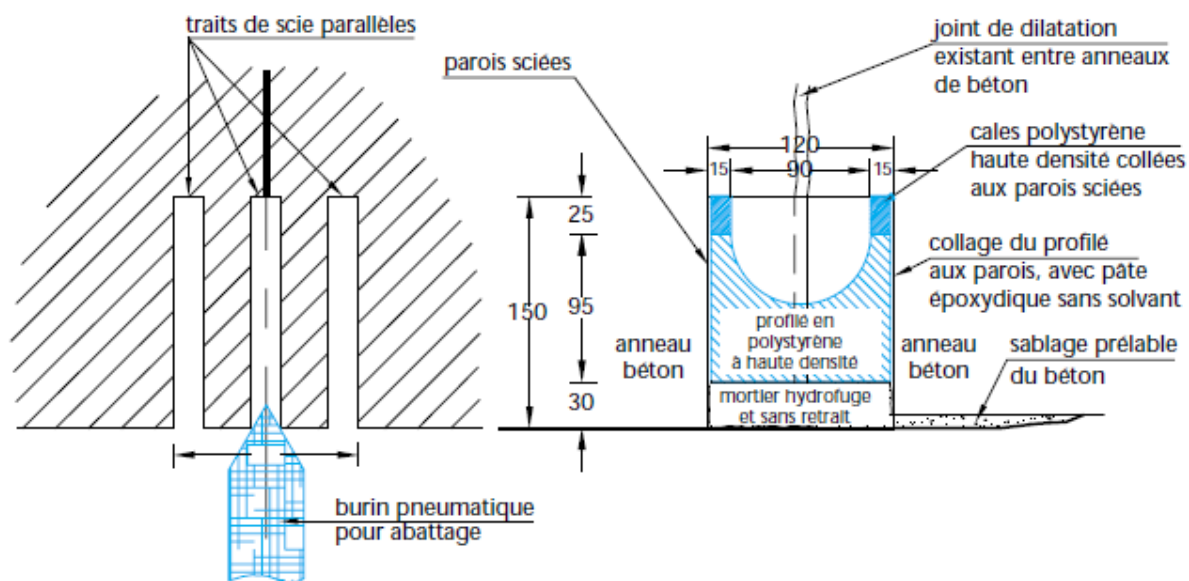


Figure 0-2 Saignées drainantes 120 x 150 en piédroits (h = 2,50m) avec protection contre le gel.

- 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) 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.

III.2. Etanchéité propre du revêtement

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.

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.

- 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 : carneaux 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.

- 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).

III.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.

III.3.a. Etanchéité extrados

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 extradados 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.



Figure 0-3 Etanchement par feuille.

III.3.b. 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.

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'étanchement 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,...).

- Observations

L'étanchéité extradors 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.

III.4. Injections

III.4.a. Injections de remplissage

Ces injections contribuent à l'étanchement 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'étanchement.

III.4.b. 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 étanchement 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. On ne doit pas compter sur les injections dans le terrain exécutées avant le creusement pour assurer l'étanchéité définitive du tunnel.

III.4.c. 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.

- Remarque

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.

III.4.d. 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.

IV. Choix du procédé d'étanchement

Le choix du système d'étanchéité dépend des critères suivants :

- nature et épaisseur de la couche de couverture de l'ouvrage,
- nature et caractéristiques mécaniques du support recevant le système d'étanchéité,
- application du système d'étanchéité en continu ou par phasage,
- possibilités de raccordement du système d'étanchéité avec ouvrages de surface ou avec d'autres systèmes d'étanchéité existants,

- accessibilité à l'ouvrage à étancher.
- surface à étancher, importance et difficulté des points singuliers à traiter,
- délais de réalisation de, travaux d'étanchéité.
- conditions climatiques prévisionnelles lors des travaux d'étanchéité.

IV.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.

IV.2. Etanchement par drainage

Dans ce cas, l'étanchement n'a pas d'influence sur la structure de l'ouvrage. S'il 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). Cette solution est donc essentiellement utilisée en réparation d'ouvrages anciens.

IV.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 visitable 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).

IV.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 pénétrations. 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.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abouti à la définition des principes généraux de l'étanchement, ainsi que les procédés d'étanchement et les critères de choix de procédé d'étanchement.

Chapitre III Produit d'étanchement

I. Introduction

L'étanchéité des ouvrages souterrains peut être réalisée avec l'utilisation de plusieurs matériaux de différents types. Chacun de ces types a des applications différentes, situations et fonctions déterminées, modes d'emploi spéciaux, etc...

II. Géomembranes synthétiques

Les géosynthétiques constituent premier composant d'un D.E.G. (Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane), et sa fonction principale est d'assurer une protection mécanique évitant le poinçonnement ou la déchire de la géomembrane d'étanchéité. Placés contre le support, leur rôle est d'absorber les défauts de rugosité de celui-ci, et notamment d'assurer une protection fiable et pérenne contre le poinçonnement statique provoqué par ces défauts.

Cet écran de protection peut être également appelé « protection extradoss» pour les ouvrages construits avec emprises, peut être constitué :

- soit d'un géotextile
- soit d'un géocomposite

Suivant les conditions particulières de l'ouvrage et du chantier, ces couches de protection intérieure ou extérieure peuvent être amenées à jouer d'autres rôles de drainage (provisoire ou définitif), de désolidarisation...,etc. Des ces rôles dépendent les autres stipulations qui peuvent lui être imposées dans le C.C.T.P. Ils conditionnent alors la composition des couches de protection.



Figure III-1 Application d'un géomembrane synthétique "protection extradoss".

II.1. Géotextiles

Les géotextiles sont fabriqués à base de polymères (essentiellement fibres de polyester et/ou de polypropylène). Ce sont des matériaux perméables et constitué exclusivement de fibres de synthèse d'une masse surfacique minimale de 700 g/m² pour les tranchées courtes, et de 600 g/m² pour les tunnels.

De nombreuses études ayant mis en évidence un risque non négligeable d'hydrolyse de fibres polyester en milieu alcalin, celles-ci seront exclues pour une application en ouvrages souterrains où les supports sont généralement en béton et remplacées par des fibres de polypropylène ou similaire.



Figure III-2Géotextiles.

Généralement est propose d'associer une fonction drainage à celle de la résistance mécanique initialement dévolue aux écrans de protection contre le poinçonnement statique. Cette fonction permettra de capter et de drainer de faibles écoulements d'eau, tout en évitant en phase chantier le passage d'eau à travers le géotextile susceptible d'altérer la bonne réalisation de la thermosoudure des lès de géomembrane d'étanchéité synthétique. En fonction des débits d'infiltration, le géotextile pourra être localement remplacé par un géocomposite de protection et de drainage.

II.1.a. Fonction et emploi

Les géotextiles peuvent avoir des utilisations diverses et variées : la séparation, la filtration, le drainage, la protection, l'étanchéité ou le renforcement. Dans de nombreux cas, on a recours à une combinaison de ces fonctions. Il semble donc nécessaire de connaître les caractéristiques techniques de ces différentes fonctions que peuvent avoir

les géosynthétiques pour pouvoir choisir le plus adapté à chaque situation et à chaque projet.

a. Fonction de Filtration

La fonction filtration d'un géotextile réside dans sa capacité à laisser passer l'eau tout en retenant les particules de sols pour éviter une contamination des matériaux voisins. Il s'agit ici de maintenir les particules de sol soumises à des forces hydrodynamiques tout en assurant l'écoulement du fluide.

Ce sont la largeur des pores et la perméabilité du géotextile qui caractérisent cette fonction de filtration. Il ne faut pas que ces pores soient trop gros, car ils laisseraient alors passer les grosses particules et cela entraînerait une érosion du sol. Par ailleurs, il ne faut pas qu'ils soient trop petits car les petites particules ne pourraient dans ce cas plus traverser et cela engendrerait la formation d'une barrière très peu perméable au-dessus du géotextile, empêchant les fluides de le traverser. On doit donc avoir un géotextile avec différentes tailles de pores coïncidant avec la distribution des tailles des particules. La compressibilité du géosynthétiques utilisé influence aussi la perméabilité.

Cette solution de filtration permet aussi de faire une économie sur les matériaux granulaires et son installation est relativement simple. On l'emploie régulièrement en remplacement des granulats filtrants dans des projets de barrages ou de protection de berges côtières ou de rivières mais aussi dans les travaux de terrassement ou les ouvrages de stockage.

b. Fonction de drainage

La fonction de drainage a pour but de faciliter l'évacuation rapide des eaux pluviales et souterraines et des autres fluides dans une structure. En introduisant un géotextile, on permet l'écoulement de l'eau dans son plan. C'est la porosité des géotextiles qui permet d'avoir un bon drainage.

Un type de géosynthétiques particulier est utilisé pour le drainage : les géodrains. Ils sont spécialement conçus pour améliorer la capacité de drainage des sols. Ces produits géosynthétiques forment une alternative avantageuse aux tranchées drainantes traditionnelles avec notamment une réduction des volumes d'excavation et une installation facilitée.

L'utilisation des géosynthétiques permet d'avoir un plan de drainage continu, même en cas de déformation du massif, et d'assurer une capacité drainante à long terme. On économise par ailleurs un volume important de matériaux drainants granulaires difficiles à mettre en œuvre. Ils sont fréquemment utilisés pour le drainage de fondations, des ouvrages routiers et des murs de soutènement.

c. Fonction de protection

La protection a pour but de limiter ou empêcher des désordres localisés dans des ouvrages de géotechnique à l'aide d'un géotextile. On place pour cela le géotextile entre

une géomembrane et le sol (ou la couche de protection) pour qu'il absorbe les contraintes localisées et protège la géomembrane d'éventuelles perforations. Sa résistance au poinçonnement et son uniformité (répartition des charges) en font la solution idéale pour ce genre de pathologie. On l'emploie pour protéger les systèmes d'étanchéité dans les projets de bassin de rétention, de réservoir ou de centre de stockage des déchets.

d. Fonction d'imperméabilisation

Dans le domaine du génie civil, l'imperméabilisation consiste à installer des géosynthétiques pour empêcher les écoulements d'eau et de produits polluants vers le sol naturel. On utilise généralement cette fonction des géosynthétiques pour les fossés ou les bassins contigus aux routes. Ce procédé vient en remplacement d'une couche d'argile d'épaisseur variable. Le gain en matériaux utilisés et la facilité d'installation du système le rendent très approprié à de nombreux chantiers (bassins de rétention, réservoirs...)

II.1.b. Propriétés mécaniques

Les fils utilisés pour la fabrication des géotextiles servant au renforcement des remblais sont caractérisés par leur module de résistance à la traction élevé. Les technologies de production utilisées (tissage en particulier) permettent la transmission de la totalité des caractéristiques mécaniques du fil au géotextile.

La disposition des fils à l'intérieur de la nappe confère aux géotextiles de renforcement un très haut module de traction et une mise en tension immédiate. En effet, il n'y a pas d'ondulation ou d'embuvage des fils et de ce fait cisaillement et contraintes internes n'apparaissent pas. Les propriétés des fils sont donc entièrement restituées par le géotextile. Ce procédé de fabrication facilite aussi la mise en œuvre sur le terrain des nappes de géotextiles et leur mise en tension.

Le procédé de fabrication des nappes de géotextiles permet l'insertion de fils avec des propriétés différentes. On pourra donc combiner plusieurs types de fils (kevlar/polyester par exemple) dans un même géotextile pour avoir des performances différentes (courbes contrainte/déformation diverses).

Une caractéristique importante des géotextiles de renforcement est son coefficient de friction. Cette grandeur définit l'interaction entre le sol et le géotextile. Une valeur élevée de l'angle de frottement interne est nécessaire à un bon ancrage du géotextile et lui permet d'être utilisé au maximum de ses possibilités et d'assurer ainsi un bon renforcement de la structure.

La résistance à la déchirure et au poinçonnement est assurée de par la structure en maille des fils du géotextile. Cela apporte une certaine cohésion d'ensemble à la nappe de géotextile et renforce sa propriété de résistance à la déchirure et au

poinçonnement. La mise en œuvre et les caractéristiques à long terme de la structure sont aussi améliorées par ce type de procédé de fabrication.

Enfin, la forme de maille ou de grille des géotextiles peut permettre une rapide revégétalisation du site.

II.1.c. Propriétés chimiques

L'environnement dans lequel est placé le géotextile peut être « agressif » et engendrer des dégradations chimiques sur le géosynthétiques. Ce risque dépend des propriétés chimiques du polymère dont est constitué le géotextile. En effet, certains polymères vont être plus sensibles à un environnement que d'autres. Les polymères synthétiques seront par exemple relativement stables sous la plupart des environnements. Cette stabilité des géotextiles face à leur environnement est nécessaire pour conserver les propriétés mécaniques intactes et ainsi assurer leur fonction de renforcement.

On peut mettre en avant plusieurs facteurs environnementaux pouvant influencer sur un géotextile :

- La température
- Les fluides présents dans le sol
- Les gaz et les vapeurs (oxygène, eau...)
- Les autres substances chimiques présentes dans le sol
- L'acidité et l'alcalinité du sol
- Les radiations électromagnétiques (rayons ultraviolets en particulier)

Le polyester a naturellement une grande résistance à l'oxydation et aux variations de température. Un grand nombre d'attaques chimiques n'ont pas d'effet nuisible sur les polyesters. Cependant, un ajout de stabilisants est parfois nécessaire pour augmenter sa résistance à l'oxydation dans des milieux fortement oxydants. Les polyesters sont aussi très sensibles aux conditions de forte acidité ou de forte alcalinité. Dans les milieux basiques, le polyester garde une excellente résistance jusqu'à un pH de 13.

Le polypropylène est très résistant aux différents environnements chimiques mais reste très sensible à l'oxydation à température élevée.

II.2. Géocomposite

II.2.a. Géocomposite de protection mécanique

Comme généralement est proposé d'associer une fonction drainage à celle de la résistance mécanique initialement dévolue aux écrans de protection contre le poinçonnement statique. En fonction des débits d'infiltration, le géocomposite de protection mécanique pourra être remplacé par un géocomposite de protection mécanique et de drainage.

La fonction drainante du géocomposite de protection mécanique et de drainage prendra encore plus d'importance en phase définitive, c'est à dire pendant toute la durée d'exploitation de l'ouvrage, car elle devra faciliter l'écoulement de l'eau provenant du terrain jusqu'au dispositif de drainage installé généralement en pied de piédroit ou de voûte.

A noter l'existence sur le marché de géocomposite de protection associant les fonctions suivantes :

- filtration avec une couche de géotextile,
- drainage avec une couche épaisse de géogrille
- étanchéité avec une mince couche synthétique (PVC.P)

Ces géocomposites de protection peuvent être utilement préconisés en cas d'eau d'infiltration fortement «incrustante» ou très chargée en fines particules du terrain.

A noter que cette caractéristique hydraulique n'est pas revendiquée par les écrans de protection, où le D.E.G. n'assure pas un drainage définitif (par exemple en tranchées couvertes).

Il est recommandé pour des débits d'eau habituellement rencontrés dans les ouvrages souterrains, les caractéristiques hydrauliques des géocomposite de protection mécanique et de drainage suivantes:

- débit minimal : 15 l/m/h
- transmissivité minimale : $4,6 \times 10^{-6}$ m²/s.

On utilisera aussi des matériaux de synthèse qui assurent essentiellement une fonction de drainage.

II.2.b. Géocomposite de drainage

Association d'un géospaceur avec un ou plusieurs géotextiles ayant une fonction filtration. Ces géocomposites de drainage sont généralement utilisés en drainage définitif des piédroits de tranchées couvertes réalisés sans emprises (sans soutènement).

Un géoespaceur est une structure poly constituée de feuilles thermo formées, ou monofilament ou de toute autre structure ayant pour fonction de créer un fort indice vide facilitant l'écoulement de l'eau, soit en phase provisoire, soit en phase définitive

Ces matériaux de drainage peuvent être utilisés pour assurer les fonctions suivantes :

- Captage provisoire d'arrivée d'eau en tunnels et tranchées couvertes et dans ce cas, ils sont systématiquement associés à un D.E.G.
- Captage et drainage définitif d'un ouvrage souterrain, et dans ce cas, le matériau de drainage est généralement utilisé seul sans D.E.G. (à l'exception de quelques cas ou il peut par exemple être associé à un D.E.G. posé uniquement en voûte ou en dalle supérieure). Le dispositif de drainage assure dans cette configuration l'étanchéité générale de l'ouvrage en favorisant le captage et l'écoulement des eaux d'infiltration autour de celui-ci, permettant d'éviter ainsi sa mise en charge hydrostatique

-

Ces matériaux peuvent être mis en œuvre de la façon suivante :

- Drainage ponctuel : Captage et drainage d'arrivées d'eau présentant localement des débits supérieurs à 0,5 l/mn. Ce drainage peut se présenter soit sous forme de cerce, lorsqu'il est mis en œuvre par bandes verticales de largeur variable, soit sous forme de lisse lorsqu'il est mis en œuvre par nappes (de 1,50 m à 2,00 m de hauteur) horizontales. Le drainage ponctuel peut être utilisé dans les cas de drainage provisoire et définitif.
- Drainage de surface : Comme pour le captage ponctuel deux cas peuvent se présenter:
 - Captage de surface provisoire : utilisé en association avec un D.E.G. pour drainer soit des zones de voûtes présentant des surfaces d'arrivées d'eau diffuses très importantes, soit des arrivées d'eau en radier.
 - Captage et drainage de surface définitif : ce dispositif de drainage, qui contribue à la fonction étanchéité est principalement utilisé pour des ouvrages réalisés en tranchée couverte, avec ou sans emprises, mais toujours hors pression hydrostatique. Généralement, ce sont les piédroits qui sont équipés de ce type de drainage, parfois les radiers [12].



Figure III-3 Géocomposite de protection et drainage.

II.3. Géomembranes bitumineuses

Les géomembranes sont composées, de manière générale, de matières thermoplastiques (polyéthylène, chlorure de polyvinyle...), de plastomères (polyéthylène chlorosulfoné) ou de produits bitumineux renforcés avec des fibres ou des géotextiles (bitume oxydé ou modifié aux polymères). Elles sont obtenues par extrusion, calandrage ou enduisage sur armature. Leur développement a pour but principal de répondre aux exigences de conception des systèmes d'étanchéité mais elles sont aussi utilisées pour d'autres applications géotechniques, du génie civil et du génie environnemental.

Cependant et du fait leur simplicité et rapidité de mise en œuvre ces systèmes sont appelés à se développer pour assurer l'étanchéité des couvertures des ouvrages visés par les recommandations.

Ils sont toujours mis en œuvre en indépendance complète sur le support, et dans ce cas l'épaisseur du remblai situé au dessous d'une zone de circulation devra être supérieure à 0.30 m (hors protection lourde). En ce qui concerne l'étanchéité des ouvrages neufs, ces systèmes non adhérents au support doivent être compartimentés. Ce compartimentage de l'étanchéité n'est pas à spécifier pour les travaux de rénovation de l'étanchéité d'ouvrages en exploitation.

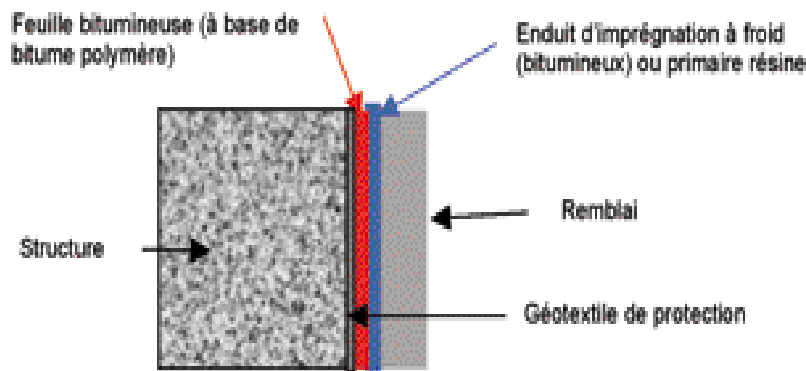


Figure III-4 la composition type d'un complexe comprenant des membranes à base de bitume

Ces systèmes sont généralement composés de :

- Une géomembrane : En bitume oxydé ou modifié aux polymères. Elle présente généralement une épaisseur nominale de 4 mm. Elle comprend également une armature en polyester, voile de verre ou composite. La face inférieure est revêtue par un produit anti-adhérent permettant la fabrication et le conditionnement. La face supérieure de la géomembrane est protégée selon les spécifications du fabricant (auto protection grésée par exemple). La géomembrane es livrée sur le chantier en largeur de 2,00 m ou de 4,00 m.
- Un système de compartimentage : Pour les applications sur ouvrages neufs comprenant :
 - l'application d'un E.I.F. sur une bande de largeur égale à celle du compartimentage +10cm,
 - une bande de feuille d'étanchéité en bitume polymère. Sans autoprotection minérale en face supérieure, d'une largeur minimale de 0,30 m.
 - Cette bande de compartimentage est soudée en plein sur le support et la géomebrane bitumineuse est ensuite soudée, également au chalumeau, sur toute la largeur de la bande de compartimentage
- Un écran de protection mécanique : Généralement composé d'un géotextile de 700g/m², conforme à la classe 3 de l'essai de résistance au poinçonnement dynamique. Pour des hauteurs de remblais supérieures à 2,00 m cette classe de résistance sera éventuellement à adapter en fonction de la nature et de la granularité de celui-ci.

En cas de présence de végétation le système doit présenter des propriétés anti-racines.

Lorsque le système d'étanchéité est à moins de 0,50 m du niveau supérieur du remblai, une protection complémentaire lourde devra être prévue. Celle-ci pourra être du type

chape de béton grillagé ou remblai roulés ou concassés mis en œuvre directement sur le système d'étanchéité [1].

II.4. Asphalte coulé

Les systèmes d'étanchéité à base d'asphalte coulé sont mis en œuvre en adhérence partielle ou totale. Ils sont à classer parmi les chapes épaisses.

Ils peuvent être [8] :

- asphalte bicouche, classique ou modifié aux polymères,
- asphalte monocouche modifié aux polymères.



Figure III-5 Système d'étanchéité à base d'asphalte coulé.

II.4.a. Asphalte bicouche

Ces systèmes sont habituellement appliqués en adhérence partielle, ce qui peut être admis en étanchéité d'ouvrage neuf mais pas en rénovation d'ouvrage ancien, du fait de l'absence, en cas de nécessité de réparation ultérieure, d'un dispositif de compartimentage et d'injection de l'asphalte bicouche.

Par conséquent le système devra être attributaire d'un Avis d'expert AFTES ou, d'un Avis Technique CETU lorsque celui-ci sera opérationnel, confirmant son « injectabilité » par l'intrados de l'ouvrage.

Les systèmes comprennent les constituants suivants:

- Enduit d'imprégnation à froid, E.I.F. (Bitume en solution ou en émulsion destiné à faciliter l'accrochage au support)
- Écran d'indépendance partielle (composé de un papier perforé, du type papier kraft ou crêpé ou d'une résine de verre, du type toile en fibres de verre tissées)
- Bandes bitumineuses pour assurer le compartimentage de l'étanchéité en asphalte (le compartimentage est assuré par une bande de 0,20 m de largeur, coupée dans une feuille bitumineuse préfabriquée du type F.P.A., compatible avec asphalte).
- Étanchéité bicouche en asphalte (mastics d'asphalte ou asphaltes coulés à gros granulats, ces matériaux sont naturellement étanches dans la masse et présentent également une bonne résistance à la pénétration des racines)

Les systèmes en asphalte coulé utilisés pour les ouvrages enterrés sont les suivants :

- Complexe A composé de :

- 4 mm d'asphalte pur AP4
- 26 mm d'asphalte gravillonné AG 3

- Complexe B composé de :

- 8 mm d'asphalte pur AP3
- 22 mm d'asphalte gravillonné AG 3

- Couche de protection lourde complémentaire (si le système d'étanchéité es à moins de 0,50 m du niveau supérieur du remblai)
-

II.4.b. Asphalte monocouche

Ces systèmes utilisant des asphaltes modifiés aux polymères sont récents. Leur adhérence totale au support leur permet de pouvoir être utilisés aussi bien en travaux d'étanchéité d'ouvrages neufs que d'ouvrages anciens.

Les systèmes comprennent les constituants suivants:

- Un primaire d'adhérence bouche-pores (résine polymère ou mélange de résines et de charges, mise en œuvre à froid ou à chaud et destiné à constituer un film imperméable à la vapeur d'eau et à améliorer l'adhérence)
- Un asphalte monocouche (Procédé faisant appel à des asphaltes de nouvelle génération, modifiés par polymères et dont le module de rigidité est abaissé par l'utilisation d'élastomères) Ces asphaltes sont appliqués à plus basse température (200 à 230°C) en adhérence totale.
- Couche de protection lourde complémentaire (lorsque le système d'étanchéité a moins de 0,50 m du niveau supérieur de remblai)

II.5. Feuilles bitumineuses préfabriquées

Deux familles de feuilles bitumineuses préfabriquées on peut trouver :

- Famille de feuilles préfabriquées bitumineuses soudées à chaud.
- Famille de feuille préfabriquée bitumineuse adhésive à froid.

II.5.a. Système bitumineux soudé à chaud

Les systèmes bitumineux sont constitués par une ou deux feuilles préfabriquées appliquées généralement en adhérence totale sur le support. Certains systèmes comprennent une deuxième couche en asphalte coulé en adhérence totale sur la feuille préfabriquée. Ces systèmes sont à classer parmi les chapes épaisses. Une application en adhérence partielle peut être envisagée, et ceci pour réduire le risque de cloquage engendré par le « dégazage » du support en cas de délais trop importants entre la mise en œuvre de l'étanchéité et de sa protection lourde, ou du remblai.



Figure III-6 Systèmes bitumineux soudés à chaud.

a. Feuilles préfabriquées monocouches

Ce système est composé par :

- Couche d'accrochage : Composée d'un Enduit d'Imprégnation à Froid (E.I.F.) appliquée à raison de 150 à 300 g/m² en fonction de l'état du support. Cet E.I.F. peut être remplacé par un primaire bouche pores, par exemple, pour obtenir une meilleure résistance du système au « dégazage » du support. La quantité à appliquer au m² sera fonction de la fiche technique du système retenu.
- Couche d'étanchéité : Composée d'une feuille préfabriquée en bitume polymère comprenant une armature en voile de polyester, ou composite, posée en adhérence totale sur le support. L'épaisseur minimale de cette feuille, hors autoprotection minérale éventuelle est le 40/10 de mm (tolérance 5%).
- Couche de protection : Généralement composée d'un géotextile de 700 g/m², conforme à la classe 3 de l'essai de résistance au poinçonnement dynamique. Pour des hauteurs de remblais supérieures à 2,00 m la résistance au poinçonnement dynamique sera éventuellement à adapter en fonction de la nature et de la granularité de celui-ci. En cas de présence de végétation le système doit présenter des propriétés anti-racines.

b. Feuilles préfabriquées bicouches

Système principalement mis en œuvre par adhérence totale. Il est principalement spécifié par exemple une exigence de résistance anti- racines est fortement souhaitée.

Ce système est composé par :

- Couche d'accrochage (E.I.F.)
- Première couche : Constituée d'une feuille préfabriquée en bitume polymère posée en adhérence totale sur le support.
- Deuxième couche : Constituée d'une feuille préfabriquée en bitume polymère soudée en plein sur la première feuille.
- Écran de protection : Généralement composé d'un géotextile. Lorsque le système d'étanchéité est à moins le 0,50 m du niveau supérieur du remblai, devra avoir une protection lourde.

c. Feuilles préfabriqué avec protection par couches d'asphalte F.P.A

C'est un système bicouche qui assure en même temps les fonctions étanchéité et protection mécanique de celle-ci. Il présente par ailleurs une propriété anti-racines très

bien adaptée à la végétalisation des couvertures d'ouvrage enterré. Il est mis œuvre par adhérence totale au support.

Ce système est composé par :

- Couche d'accrochage : Composée d'un Enduit d'Imprégnation à Froid (E.I.F.).
- Couche d'étanchéité et de protection : Le système comprend les couches suivantes :
 - une première couche constituée par une feuille préfabriquée en bitume polymère posée en adhérence totale sur le support. Celle-ci devra être compatible avec l'asphalte coulé en deuxième couche.
 - une deuxième couche d'étanchéité et de protection mécanique en asphalte gravillonné AG 3 coulé à chaud, de 25 mm d'épaisseur.

Lorsque le système d'étanchéité est à moins de 0,50 m du niveau supérieur du remblai, une protection complémentaire lourde devra être prévue. Celle-ci pourra être soit une chape de béton grillagé, soit une deuxième couche d'asphalte AG 3 ou d'enrobés bitumineux.

II.5.b. Système bitumineux adhésif à froid

Ils restent peu utilisés pour l'étanchéité des ouvrages souterrains ou enterrés. Cependant ils peuvent en faire un système susceptible d'être mis en œuvre pour assurer l'étanchéité des couvertures d'ouvrages enterrés. Compte tenu diversité de leur composition, et très souvent de leur extrême sensibilité par exemple aux conditions climatiques lors de leur mise en œuvre, il est fortement recommandé de ne spécifier que des systèmes bénéficiant d'un Avis d'experts AFTES ou d'un Avis Technique étanchéité du CETU lorsque la procédure sera opérationnelle.

Ces sont des systèmes associant une membrane synthétique très mince, du type P.E.H.D (polyéthylène haute densité) stratifiée et croisée, à une couche de bitume modifié par élastomère auto adhésive à froid. L'épaisseur minimale des systèmes est généralement de 1,5 mm. Ceux-ci sont mis en œuvre en adhérence totale sur le support et ils comprennent :

- Un primaire d'accrochage à base de bitume élastomère solvanté, mis en œuvre au rouleau ;
- Une membrane d'étanchéité déroulée et adhésive à froid sur le primaire ;
- Une protection mécanique composée généralement de plaques bitumineuses de 3 mm d'épaisseur ou d'un géotextile.

Lorsque le système d'étanchéité est à moins de 0,50 m du niveau supérieur du remblai, une protection complémentaire lourde devra être prévue. Celle-ci pourra être soit une chape de béton grillagé, soit une deuxième couche d'asphalte AG 3 ou d'enrobés bitumineux.



Figure III-7 Systèmes bitumineux adhésifs à froid.

II.6. Béton drainant

Un béton drainant est un béton dont la porosité est supérieure à 15 %. On caractérise par conséquent un béton drainant par sa résistance à la compression et par sa perméabilité.

Le béton drainant est également appelé «béton semi caverneux ou caverneux». Il ne peut être ni armé, ni pompé.

Le béton drainant est surtout utilisé en surface horizontale, généralement sous un radier, et peut être associé aux dispositifs de drainage ou d'étanchéité suivants :

- drainage d'un ouvrage : le béton drainant sous radier vient compléter le dispositif de drainage mis en œuvre en piédroit ou en voûte, du type géospaceurs ou géocomposites de drainage.
- drainage seulement d'une partie d'ouvrage d'un radier de tunnel, par exemple étanché en piédroit et en voûte par un D.E.G.

Du fait de leur porosité importante. Les bétons drainants ont une résistance relativement faible. Par conséquent. Il y a donc lieu de chercher un compromis entre la résistance de ces bétons et leur perméabilité.

Résistance à la compression :

La résistance caractéristique $f_c 28$ correspond à la résistance à la compression du béton à 28 jours sur cylindres 16 x 32 cm.

Il est recommandé de demander $f_c 28 \geq 8$ Mpa.

Perméabilité :

La perméabilité est déterminée en mesurant le débit d'eau traversant un cylindre 16 x 32 cm.

Le coefficient de perméabilité est mesuré par application de la loi de DARCY,

$$V = KJ = K \frac{dh}{ds}$$

dans laquelle :

K est le coefficient de perméabilité

$J = dh/ds$ est le gradient hydraulique

V est la vitesse d'écoulement ou le débit par unité de surface

Il est recommandé de spécifier $V \geq 0,02$ m/s, soit $V \geq 0,20$ l/dm²/s

Un dispositif de drainage est à associer obligatoirement à un béton drainant pour assurer un contrôle et éventuellement une maintenance continue de celui-ci. La conception et la densité de celui-ci sera bien entendu fonction des débits à évacuer vers l'assainissement «eaux claires» de l'ouvrage, et des caractéristiques physico chimiques des eaux captées.

Les dispositions minimales à spécifier sont les suivantes :

- drains, de préférence en polyéthylène de 100 mm de diamètre minimal, pouvant être inspectés par caméra.
- regards d'accès au dispositif de drainage tous les 25 à 50 mètres maximum (cette distance déterminée en fonction des résultats des analyses chimiques) [1].



Figure III-8 Application du béton drainant.

III. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître les différents matériaux utilisés dans l'étanchéité des ouvrages souterrains, à noter les géomembranes synthétiques, les géomembranes bitumineuses, l'asphalte coulé, les feuilles bitumineuses préfabriqués et aussi le béton drainant.

Chapitre IV
Les Réparations
d'étanchéité en souterrain
par injection

I. Introduction

Les travaux de réparation d'étanchéité (essentiellement injection d'étanchéité) consistent en la mise en œuvre d'un nouveau système d'étanchéité et s'apparentent alors à des travaux neufs.

Les travaux de réparation s'intéressent à un ouvrage existant: ils doivent donc s'adapter à ses caractéristiques. Il appartient au Maître d'Ouvrage de rassembler tous les renseignements existants sur l'ouvrage et son environnement: la qualité du dossier technique qu'il constituera est la condition déterminante pour l'obtention d'un résultat final satisfaisant.

Les travaux de réparations sont généralement coûteux, d'une part parce qu'ils font appel à des techniques et à des produits chers, d'autre part parce qu'ils sont souvent soumis à des contraintes importantes dues à la nécessité de maintien en exploitation (partielle ou totale) de l'ouvrage.

Dans tous les cas, les travaux de réparations d'étanchéité doivent être effectués par des entreprises spécialisées.

Le Maître d'Ouvrage ou le Maître d'œuvre doit bien étudier les problèmes d'étanchéité que lui pose son ouvrage, et après choisir la ou les solutions adaptées et préparer la consultation des entreprises.

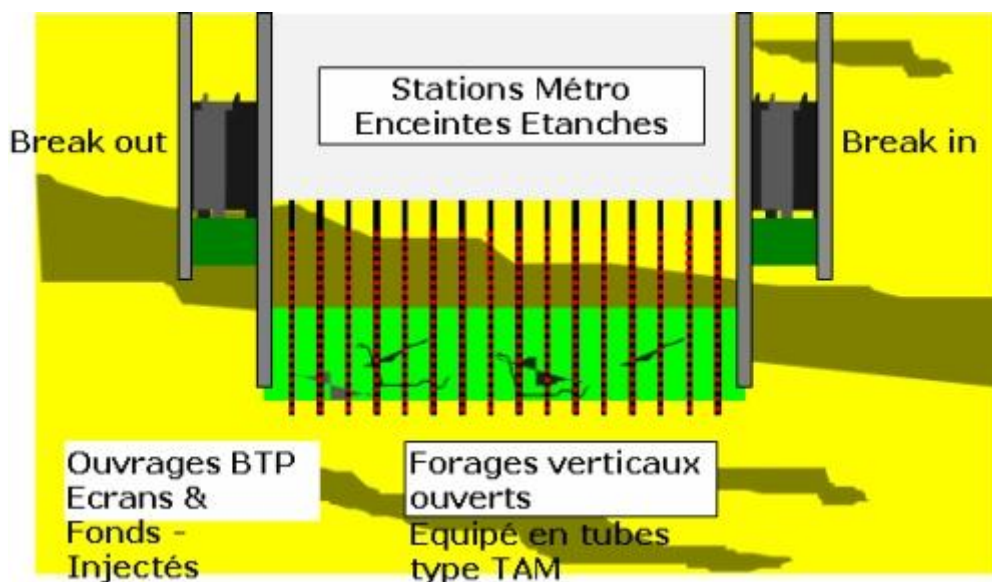


Figure IV-1 Réparation de l'étanchéité par injection (cas d'une station métro).

II. Principe de l'injection

L'injection consiste à introduire dans le terrain (sol ou roche), sous forme "liquide", un matériau susceptible d'occuper la porosité, afin de réduire la perméabilité et d'améliorer la cohésion.



Figure IV-2 Principe de la réparation par injection.

Le déplacement du matériau injecté (coulis), est maîtrisé par ajustement des caractéristiques rhéologiques et le contrôle des paramètres fondamentaux, pression/débit. La zone d'injection est délimitée par des "packers".

Les études spécifiques sont indispensables à l'élaboration du projet, les essais et en particuliers la validation des méthodes doit, lorsqu'elle est requise, être effectuée avant préparation du DCE.

L'abandon des d'étude de validation, peut conduire à masquer des aléas, qui s'accompagnent souvent de variations significatives des quantités et conduisent au bouleversement de l'économie du marché travaux.

Les variations quantitatives ou le dysfonctionnement des procédures prévues au CCTP doivent alors être gérées dans le cadre du contrat travaux, ce qui se traduit souvent par des retards dans la réalisation des travaux et par un impact non négligeable en terme de coûts.

Les études préliminaires rassemblent l'ensemble des éléments que le Maître d'Œuvre a à sa disposition concernant l'ouvrage souterrain: documents provenant de la construction et de l'exploitation, rapports spéciaux d'études ou d'essais spécifiques.

Les recommandations générales sont les recommandations établies par l'AF.T.E.S pour l'étanchéité des ouvrages souterrains. Elles s'appliquent essentiellement à la mise en

œuvre de l'étanchéité pendant la construction des ouvrages. En fait, elles peuvent être utilisées pour un projet de réparations dans deux cas:

- possibilité de mise en œuvre d'une étanchéité d'intrados sur support béton coffré: il s'agit dans la plupart des cas d'une étanchéité de traitement de joints.
- nécessité de reprise de la structure de l'ouvrage. La réparation de l'étanchéité est alors intégrée à ces travaux de génie civil.

Limites du traitement

Le traitement des sols par injection est conditionné par la dimension des pores ou la taille des fissures et les contraintes géostatiques existants au droit des niveaux à traiter.

Les études préliminaires comprennent :

- Dossier Technique d'ouvrages (A1) : Le dossier d'ouvrage que l'on peut, en général, trouver aux archives départementales ou à la subdivision territoriale.
- Dossier Géologique (A2): Dans le cas d'un ouvrage récent la consultation du dossier d'ouvrage donnera tous les renseignements utiles, dans le cas d'un ouvrage ancien, les renseignements de base seront donnés par la carte géologique avec un complément éventuel de levé de terrain en surface et en souterrain par les points où le terrain est visible. Si ces renseignements sont insuffisants il peut être nécessaire de faire des reconnaissances complémentaires.
- Auscultations et visites précédentes (A3): Ce document, constamment tenu à jour, est le recueil des informations relatives à la vie de l'ouvrage depuis la date de l'état de référence.
- Relevés météo
- Niveau S (service) Conditions Générales de Service : Elles doivent regrouper les données provenant de l'exploitation.
- Niveau V Visite d'ouvrage : Ces résultats font la synthèse de constatations visuelles, mesures, d'auscultations et d'investigations dans et derrière le revêtement.

III. Produits et solutions possibles

Au cours de l'étude, il se peut arriver à la nécessité de réparer l'étanchéité avec la mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité, ou par injection dans le massif. Le choix des produits constitutifs des coulis d'injection dépend du niveau de risque à long terme pour l'environnement. Il ne s'agit plus de risques de pollution accidentelle, mais de modification durable des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à proximité des sols traitées par injection.

Les injections peuvent être de :

- Bentonites
- Ciments
- Silicates
- Polymères (Polyuréthanes, Epoxydiques, Acryliques).



Figure IV-3 Coulis à base de ciment.

L'ensemble des différentes solutions doit, au moment de la conception de la solution, être envisagé en tenant compte des paramètres propres au chantier.

Ces paramètres sont de plusieurs types et sont liés aux relevés et observations faites sur l'ouvrage :

- type de fissures du revêtement en béton coffré,
- possibilités d'emploi en fonction des éléments liés à l'eau,
- paramètres d'emploi des produits par rapport au milieu injecté,
- nécessité des conditions de mise en œuvre,
- conditions de service.

IV. Mise en œuvre

IV.1. Normes

Suivant les normes en vigueur, chaque projet doit comporter une étape de validation, définissant la faisabilité et l'efficacité du procédé eu égard aux objectifs définis.

Les procédures d'essais recommandées pour le contrôle des travaux, figurent également dans la norme européenne.

- Exécution des travaux géotechniques spéciaux, Injections - Norme EN 12715

La prise de conscience collective, activée vers la fin des années 90, par l'application des directives concernant la protection de l'environnement, se traduit aujourd'hui, par une approche plus prudente à l'égard de matériaux utilisés et des besoins réels de consolidation ou étanchement des terrains.

IV.2. Critères de qualité

Pour une bonne mise en œuvre :

1. Vérification de la méthode et des moyens techniques de forages, leur équipement, la méthode d'injection et l'adéquation de la composition des coulis, en fonction des paramètres admissibles (débit – pression – rayon d'influence et maillage des forages).
Vérification de l'objectif atteint au regard des critères de traitement (perméabilité et cohésion des terrains à traiter).
2. Ajustement le cas échéant de la méthode et des paramètres d'injection pour satisfaire à l'objectif.
3. Etablissement du DCE, spécifications définitives et devis quantitatif et estimatif.
4. Les dispositions organisationnelles du programme de contrôle doivent être définies par le concepteur au niveau du DCE :
 - Plot d'essai au démarrage des travaux
 - Contrôle en cours d'exécution
 - Contrôle de réception

Ces dispositions devront être intégrées par l'entreprise dans le Plan d'action Qualité, qu'il lui appartient d'établir avant le démarrage des travaux. La nature et la fréquence des essais à entreprendre varient néanmoins selon le type et l'extension de l'ouvrage [2].

V. Recommandations

L'injection des sols fins au tube à manchette constitue une application souvent limitée en termes de faisabilité aux égards à la perméabilité et aux contraintes géostatiques. Il convient dans ce cas de prédéterminer un débit d'injection qui tient compte de l'ensemble des paramètres suivants [12] :

- De la perméabilité et caractéristiques du sol,
- De la profondeur de l'injection,
- De la rhéologie du coulis.

S'écrit :

$$Q < Q_{lim} \quad Q_{lim} \leq 2K_0 \pi \frac{\eta_0 e}{\varpi \eta \ln(R/r_0)} \cdot \gamma h (1 + \sin \varphi) v$$

Où :

Q = débit en $m^3 \cdot s^{-1}$

ϖ = densité du coulis

η = viscosité cinématique du coulis en MPa.s

Méthode GIN (GROUTING INTENSITY NUMBER)

En milieu fissuré, l'injection est menée de manière régulière et continue en vue d'atteindre progressivement l'une des limites du domaine défini par l'hyperbole correspondante [12]:

$$P \times V = I \quad (I = \text{indice d'intensité d'injection}).$$

P : pression de l'injection

V : Volume de coulis injecté.

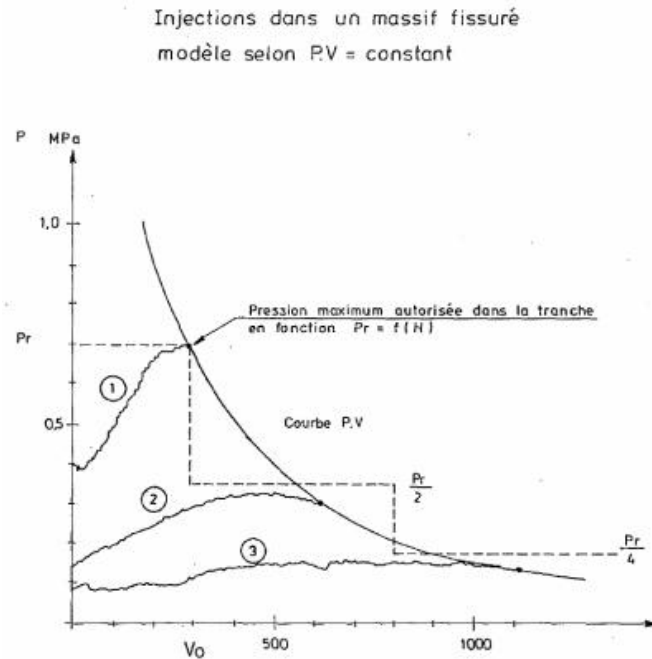


Figure IV-4 Injection selon $P.V = \text{constant}$.

VI. Contraintes de qualité

La qualité de l'injection dépend de :

- Procédures d'exécution relatives aux contrôles d'injection
- Maîtrise du produit non-conforme
- Actions d'améliorations
- Documentation forage et injection
- Contrôle du matériel
- Contrôle de qualité des produits et des coulis
- Contrôle de la mise en œuvre

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons définis une des méthodes les plus utilisés dans la réparation d'étanchéité en souterrain il s'agit de la méthode d'injection. La facilité de sa mise en œuvre et son efficacité font d'elle la solution la plus simple et rentable dans la réparation d'étanchéité des tunnels anciens.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'élaboration de ce travail nous permet de définir l'étanchéité comme étant la fonction qui fait qu'un produit ou un ensemble de produits s'oppose au franchissement par un liquide tel que l'eau.

Nous avons dans un premier lieu fait une constatation sur l'état des ouvrages souterrain après avoir été infiltré par l'eau et noter la nécessité de leur étanchéité pour assurer leur durabilité.

Nous avons ensuite défini les principes généraux de l'étanchement ainsi que les procédés d'étanchement et les critères de choix de procédé d'étanchement.

Nous nous sommes intéressés après par la connaissance des différents matériaux utilisés dans l'étanchéité des ouvrages souterrains et le mode de fonctionnement de chacun d'eux.

Enfin, nous avons expliqué le principe de la méthode d'injection qui est une méthode de réparation d'étanchéité des tunnels anciens.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] **AFTES**, Recommandations relative l'étanchéité et le drainage des ouvrages souterrains, TOS, 2005.

[2] **AFTES**, Recommandations relatives aux travaux d'injections pour les ouvrages souterrains, TOS, 1987.

[3] **A. BOUVARD, G.COLOMBERT, F.ESTEUILLE** « ouvrages souterrains Conception-Réalisation-Entretien »-1988

[4] **CETU**, Centre d'Etude des Tunnels, *Dossier pilote des tunnels Génie Civil. Section 5- 1988*

[5] **CETU**, Centre d'Etude des Tunnels, *Dossier pilote des tunnels Génie Civil. Section 7- 1988*

[6] **Christian TRIDON, Bernard FARGEOT**, Entretien et réparation des équipements d'ouvrages, STRRES, 2009.

[7] **Guide Technique SETRAICTOA**, Bagneux. Réf: 9613, Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton (août 1996).

[8] **M.BEAU, M.REITH**, « Etanchéité des ouvrages souterrains », Ressaisie DTRF, 1992.

[9] **P.BERGER, M.FRAGNET**, Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'arts, SETRA, 1998.

[10] 'Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillance', Activité 5. Systèmes de parades Parade 10 – Béton projeté, 2003.

- Site Internet

[11] <http://www.aftes.asso.fr/>

[12] <http://www.outils-cetu.fr/didactu/tunnel/realisation/realisation/etancheite/Taches%20sur%20la%20vote%20et%20les%20pdroits.html>