

Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers

Du désordre vers le diagnostic



Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers

Du désordre vers le diagnostic

Sécurité des usagers, niveau de service de l'ouvrage et conservation du patrimoine sont les objectifs permanents des maîtres d'ouvrages.

Formalisée dans l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) de 1979 et ses révisions, la surveillance organisée est l'outil fondamental pour accéder à une bonne connaissance des ouvrages et à la bonne gestion d'un parc.

Le point de départ de cette connaissance est le constat de l'état de l'ouvrage, en particulier lors de l'inspection détaillée, stade le plus élaboré de la surveillance (hors instrumentation).

La qualité du constat, la pertinence du jugement reposent toujours sur la compétence et l'expérience des personnes. Savoir observer, déceler un désordre naissant, prévoir autant que possible les conséquences d'une évolution défavorable, permettent de fournir au gestionnaire les informations nécessaires pour assurer un suivi et une maintenance préventive et non plus seulement un traitement curatif.

Ce document est composé de deux parties :

- le **fascicule amovible** est le guide proprement dit. Il présente la terminologie et les origines des désordres, les étapes d'élaboration progressive d'un diagnostic et la manière de réaliser une inspection détaillée. Les aspects réglementaires sont également évoqués. Le fascicule est complété de 12 annexes apportant des informations supplémentaires sur les thèmes essentiels ;
- le **catalogue des désordres** comprend 45 fiches reliées décrivant les principaux désordres constatés dans les tunnels routiers, ainsi que la manière de les détecter, de les identifier et de les évaluer.

Ce document peut permettre d'aider à la formation des agents chargés des inspections, mais aussi éclairer les gestionnaires sur les risques spécifiques au génie civil des tunnels, particulièrement pour les plus anciens d'entre eux.



Sommaire des fiches de désordres	N° de fiche
Désordres dus à l'eau	
Concrétions	1
Efflorescences sur mortiers et bétons	2
Désordres liés au gel	3
Désordres des sections non revêtues	
Masses ou blocs lachés	4
Plaques ou bancs fléchis	5
Culots de tir instables	6
Karsts et cavités	7
Désordres communs aux maçonneries et aux bétons	
Fissures structurelles longitudinales	8
Fissures structurelles obliques	9
Fissures structurelles transversales	10
Zones sonnant le creux	11
Rupture de voûte, ruine	12
Épaufrures	13
Désordres spécifiques aux maçonneries	
Alvéolisation	14
Desquamation	15
Exfoliation de moellons	16
Écaillage mécanique de moellons (ou de briques)	17
Altération des mortiers	18
Déjointoiement	19
Aplatissement, pincement	20
Méplat	21
Ventre	22
Désaffleurement d'assises de moellons (ou briques)	23
Désordres spécifiques aux bétons	
Fissures de retrait	24
Fissures en lunules	25
Désordres des joints de bétonnage	26
Nids de cailloux	27
Altération des bétons	28
Écaillage mécanique du béton	29
Éclatement sur armatures	30
Désordres des éléments préfabriqués voûtés	31
Désordres des bétons projetés	32
Défauts d'aspect des bétons coffrés	33
Désordres des radiers et chaussées	
Désordres des radiers	34
Désordres des chaussées	35
Désordres des têtes	
Désordres des têtes	36
Désordres des structures dédiées à la ventilation	
Désordres des plafonds, appuis, cloisons	37
Désordres des dispositifs d'étanchéité, drainage et assainissement	
Désordres des drains d'intrados	38
Désordres des drains et caniveaux d'extrados	39
Désordres des drains de chaussée	40
Désordres des feuilles d'étanchéité	41
Désordres des tôles parapluie	42
Désordres des cuvelages d'étanchéité	43
Désordres des enduits minces	44
Désordres des complexes isolants étanches	45

Informations complémentaires

Concrétions calcaires

Elles sont le résultat de la précipitation de carbonate de calcium (ou calcite) sur le parement à partir d'eaux en charge ayant transité dans les terrains (et au travers d'un revêtement) dont la pression est ramenée à la pression atmosphérique. La carbonatation superficielle du béton favorise aussi un dépôt de calcite, mais celle-ci provient de la dissolution du liant (Fiche 28).

L'épaisseur et l'étendue du concrétionnement seront d'autant plus importantes que les eaux sont déjà naturellement chargées en bicarbonates (tunnels en zone calcaire).

Une trop forte accumulation locale (à partir d'un joint ou d'une fissure) peut conduire à leur décollement et à leur chute. Différents termes, issus de la spéléologie, permettent de décrire plus précisément les formes de ces concrétions :

- stalactites : sur exutoire ponctuel ;
- draperies ou rideau : sur exutoires linéaires (fissures, joints) ; elles sont en relief marqué ;
- nappage ou voile : le revêtement entier devient invisible sous une couche concrétionnée.

Un concrétionnement provoqué par une eau incrustante en provenance du terrain a généralement une teinte beige à jaunâtre qui témoigne des impuretés fixées par la calcite. En revanche, la calcite provenant directement de la dissolution de la chaux d'un béton est très blanche ; elle souligne les fissures fines ou forme des stalactites ou des coulures sans épaisseur sur le parement. On retrouve aussi ces 2 types de calcite dans les dispositifs de drainage.



Concrétions calcaires encroûtantes au débouché d'un karst actif dans un tunnel abandonné

Concrétions sulfatées

Beaucoup plus discrètes que les précédentes, voire absentes en tunnels routiers, ces cristallisations millimétriques dures et cassantes, constituées de gypse, révèlent la présence de sulfates, soit au sein du revêtement soit en provenance du terrain. Elles sont plus fréquentes dans les tunnels ferroviaires anciens où la traction au charbon a généré un stock de soufre qui a imprégné les maçonneries. En cas de doute, une analyse chimique de ces croûtes est recommandée pour rechercher une agression éventuelle.



Stalactites et coulures de calcite blanche sur du béton projeté (dissolution de la chaux du ciment par percolation des eaux du terrain)



À gauche : concrétions claires de calcite
À droite : dépôt de gel rouge, riche en oxyde de fer

Description (aspect visuel du désordre)

- a. **Concrétions calcaires**: cristallisation solide et parfois épaisse de calcite, de teinte variable (impuretés) et adhérent sur le parement, émanant de fissures, de zones poreuses ou de joints humides.
- b. **Concrétions sulfatées**: cristallisations de gypse, dures, cassantes, souvent noirâtres (suiés), parfois miroitantes, sur des joints ou des fissures.

Méthodes d'examen

Examen visuel - vérifier l'état du support si les concrétions le masquent en totalité.

Paramètres à relever

Concrétions ponctuelles ou étendues (S m²) - épaisseur moyenne - stabilité pour les plus épaisses.
Prélèvement d'échantillons pour analyses en cas de doute sur la nature du produit.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau ponctuelles, continues.
Altérations du support.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

- a. Précipitation du carbonate de calcium dissous dans l'eau provenant soit du terrain encaissant calcaire, soit de la dissolution du liant du béton ou du mortier.
- b. Les sulfates peuvent être véhiculés par les eaux du terrain ou provenir des gaz de combustion (surtout tunnels ferroviaires anciens).

Conséquences, évolutions possibles

- a. Extension, épaisseur croissante du(des) dépôts pouvant conduire à des chutes de plaques.
- b. Progression de l'attaque sulfatique.

Dangers pour les usagers

Chutes de morceaux de concrétions (très rare).

Risques pour les structures

Minime en l'absence d'attaque sulfatique avérée.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Purges préventives en cas de tendance au décollement de plaques de concrétions.
Drainage des venues d'eau ponctuelles décelables.

Observations

Voir aussi fiches 2 (*Efflorescences*), 28 (*Altération des bétons*), 38 (*Drains d'intrados*), 39 (*Drain de base de feuille*), 40 (*Drains de chaussée*).

Informations complémentaires

Bien qu'appartenant aux exsudats au sens large, les efflorescences évoquées ici sont la manifestation d'une altération particulière du matériau par les sulfates. L'appellation évoque parfaitement l'aspect et le mode de croissance.

Mortiers

Elles se cantonnent à la surface des joints, sous la forme d'un chevelu blanc parfois très dense, qui est le témoin d'une attaque sulfatique du mortier. Des analyses chimiques les ont identifiées comme étant du sulfate de sodium plus ou moins hydraté (à ne pas confondre avec le salpêtre qui est un nitrate). Ce sel se libère du mortier par extrusion en surface. Il est l'indice visible d'une possible formation interne (et microscopique) d'ettringite secondaire ou de thaumasite, sels expansifs et pathogènes, appelés aussi sels de Candlot.

Les efflorescences apparaissent au gré des variations d'humidité du support, et disparaissent par dissolution quand celui-ci devient mouillé.

Certains rejointoiements au mortier de ciment ou enduits sont décollés par cette cristallisation provenant de l'ancien mortier sous-jacent.

En cas de doute, il est recommandé d'effectuer des prélèvements aux fins d'analyse chimique et d'examen par microscopie électronique.



Efflorescences sur mortiers anciens
à base de chaux



Efflorescences sur mortiers anciens
à base de chaux

Bétons

Beaucoup moins spectaculaires que dans les maçonneries, les efflorescences ont été observées à la surface de certains bétons anciens (granulats de gneiss), d'enduits au mortier, ou de bétons projetés.

Elles peuvent apparaître aussi à la surface des bétons situés dans des espaces peu ventilés de tunnels soumis à un trafic intense (niches, espaces annulaires entre tôles et excavation, galeries techniques...). Leur origine proviendrait de l'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2) rejeté par les véhicules sur un support humide (attaque acide).



Efflorescences au ras du sol
sur un béton de 1976

Description (aspect visuel du désordre)

Filaments blancs ayant un aspect de « chevelu », extrêmement fragiles et salés au goût, recouvrant la totalité du joint ou couvrant une surface d'étendue variable sur un enduit ou un béton. Ils se forment par extrusion au travers des pores du support. Apparition ou disparition très rapide en fonction de l'humidité du support ou de l'hygrométrie ambiante.

Méthodes d'examen

Examen visuel et à la loupe, goût salé.

Paramètres à relever

Ponctuel ou étendu – points d'apparition – nature et état d'altération du support.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Autres altérations du support – déformations indiquant un gonflement (maçonneries ou enduits), décollements (enduits), exfoliations, fissures – concrétions de gypse.

Rechercher une source éventuelle extérieure de sulfates.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Eaux chargées en sulfates. Les efflorescences indiquent une attaque sulfatique du mortier ou du béton ; la présence interne d'ettringite secondaire, dont la cristallisation est expansive et destructrice, est à faire rechercher (par microscopie électronique à balayage).

Conséquences, évolutions possibles

Un gonflement interne important peut affaiblir le revêtement, ou décoller les enduits. Les maçonneries y sont très sensibles.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Aucun si l'attaque est superficielle.

Si de l'ettringite secondaire est mise en évidence, rapide dégradation des joints en maçonneries, gonflements ou décollements possibles des bétons ou enduits.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Préventif : essentiellement lors du choix des ciments.

Observations

Le terme « efflorescence » a ici un sens volontairement restrictif, afin de caractériser précisément ce type particulier d'exsudat rencontré le plus souvent dans les maçonneries anciennes. Pour les autres ouvrages d'art, le terme a un sens plus général, englobant aussi les concrétions diverses apparaissant sur les parements.

Voir aussi fiches 18 (Altération des mortiers), 28 (Altération des bétons).

Informations complémentaires

Le gel est un processus essentiellement physique progressant vers l'intérieur du matériau (pierre, béton, brique, parpaing). Sa propagation est conditionnée par la porosité et la saturation en eau du matériau ainsi que par la fréquence et l'intensité des cycles gel-dégel. Le gel se manifeste souvent en surface par des émiettements ou décollements de plaquettes et de petits éléments. Il peut atteindre le coeur du matériau en provoquant des éclatements plus importants, un délaminage ou de la fissuration.

Il est admis que ses effets mécaniques visibles sont moins liés à la pression expansive de la glace elle-même qu'aux pressions hydrauliques qui se développent dans les pores les plus fins et non encore gelés et qui vont dépasser la résistance à la traction du matériau, provoquant fissures et éclatement.

Un matériau non saturé est donc moins sensible au gel. Un gel permanent a un effet imperméabilisant sur un matériau saturé.

Dans les moellons

La porosité communicante de la roche est défavorable à la résistance aux effets du gel. Parmi les roches les plus sensibles, on peut citer les calcaires oolithiques, les dolomies, les grès.



Effet du gel sur des pierres de taille de calcaire oolithique

Dans un béton coffré

La présence de 5 à 7% de bulles d'air de petit diamètre (50 à 200 µm) jouant le rôle de « vase d'expansion » limite les effets délétères du gel. C'est le rôle des entraîneurs d'air que de créer dans la pâte un réseau de bulles dense et stable. Pour les bétons anciens, leur porosité plus importante mais insuffisamment bien répartie ne compense pas leur faiblesse sur le plan mécanique et, au final, on constate sur ces bétons des désordres parfois importants dans les zones les plus exposées (têtes), mais aussi en section courante (zones saturées au droit de venues d'eau permanentes).

Dans un béton projeté

On note parfois une exfoliation superficielle, particulièrement en calotte, où l'eau « stagne » derrière la coque de béton projeté, favorisant son humidité permanente.

Dans des conditions très sévères, les gunites peuvent être progressivement décollées de leur support par les formations de glace à l'interface. Des plaques importantes peuvent se détacher.

Les accumulations de glace à l'intérieur de certains tunnels créent de fortes contraintes d'exploitation et peuvent conduire à la destruction de structures secondaires fragiles (cuvrages d'étanchéité, drains d'intrados, enduits).



Stalactites et amas de glace au sol



Enduit décollé par le gel



Pilier de béton armé gelé

Description (aspect visuel du désordre)

Formation de stalactites, amas, plaques de glace.

Effritement superficiel des matériaux en plaquettes, voire formation de cavités (bétons) – éclatements de drains non isolés.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Surface affectée par les décollements – profondeur moyenne – consistance du matériau affecté (bétons).

Ruptures de drains.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Qualité du matériau – risque d'instabilités locales – amincissement du revêtement.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Circulation d'eau dans un support poreux – gel prolongé et fort – nombreuses alternances gel-dégel.

Conséquences, évolutions possibles

Affaiblissement des structures.

Perte de fonction des drains.

Dangers pour les usagers

Chutes de stalactites, de matériaux altérés, perte d'adhérence (verglas).

Risques pour les structures

Affaiblissements locaux.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Purges quotidiennes des amas de glace.

Drainage avec isolation thermique – étanchement.

Observations

Informations complémentaires

Toute excavation non revêtue évolue par décohesion progressive, d'autant plus rapide que la roche est fracturée ou peu résistante. Le diagnostic d'instabilité repose sur l'observation visuelle rapprochée, sous plusieurs angles, et sur l'auscultation prudente au marteau. Il est fréquent que cette action conduise involontairement à supprimer le défaut lorsqu'il est de volume réduit, c'est pourquoi il convient d'être très prudent. L'emploi du marteau permet aussi d'évaluer (statistiquement) le degré d'instabilité de la surface d'une excavation, dont l'aspect peut être très trompeur.



Masse de roche fracturée séparée du terrain par un joint argileux (on parlera ici de « pont de roche instable »). Une purge est possible, dans un premier temps

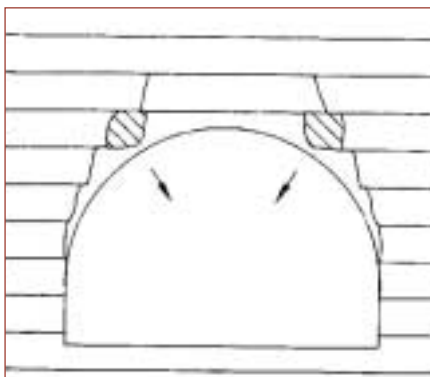


Instabilités résiduelles dans la zone de l'alésage latéral

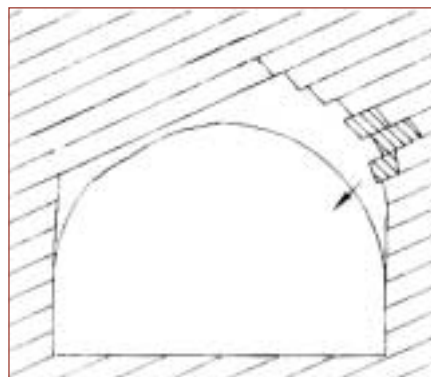
Le cas de figure dangereux est celui du terrain peu structuré, où la notion de « bloc » géométriquement défini n'apparaît pas. C'est le cas, par exemple, de certains calcaires dolomitiques aux discontinuités peu apparentes, dans lesquels la détection d'une instabilité ne peut se faire qu'à l'aide du marteau ; seule la réponse sonore de la roche indique un décollement superficiel, dont on s'attachera alors à cerner l'étendue et la gravité.

Dans un massif fortement fracturé, on essaiera de dégager, zone par zone, les caractéristiques principales des instabilités (volumes, épaisseur décomprimée, localisées, générales), dans l'optique d'une purge ou de confortations.

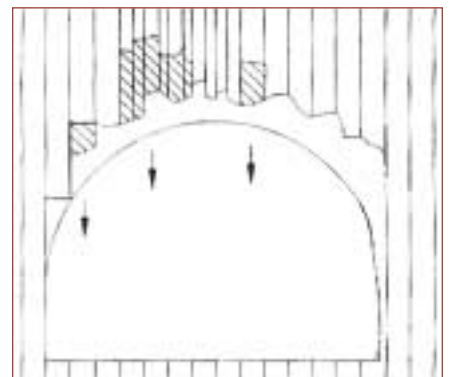
Masses ou blocs lâchés - Volumes unitaires faibles à moyens, mais multiples



Pendage sub - horizontal
Extrémités de bancs non butées, instables



Pendage oblique
Risque de glissement sur bancs



Pendage vertical
Chute de blocs

Description (aspect visuel du désordre)

Blocs décollés du massif par fissures ou diaclases ouvertes.
L'emplacement d'un bloc déjà tombé se repère par une tache plus claire.

Méthodes d'examen

Examen depuis le bas, avec éclairage puissant (méthode peu fiable).
Examen rapproché, auscultation prudente au marteau (réponse sonore de l'objet, instabilité réelle ou apparente).

Paramètres à relever

Mesure de l'ouverture des principales discontinuités ou fissures (en mm) et de leur orientation dans l'espace (direction, pendage).
Estimation de la maille moyenne de fracturation, des volumes unitaires, d'un volume global (en dm^3 ou m^3), d'une surface affectée (m^2).
Dureté de la roche, présence d'argile et d'humidité dans les discontinuités.
Géométrie défavorable à un bon effet de voûte.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Présence de failles, de karsts.
Discontinuités dont le pendage vers l'intérieur du tunnel peut faciliter un glissement des masses.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Structure et fracturation originelle du massif, décompression naturelle de la surface libre, fracturation induite par les tirs anciens, purge incomplète après alésage.

Conséquences, évolutions possibles

Chutes progressives par déstabilisation des blocs adjacents et fragilisation progressive de certaines parties de la voûte (suppression de butées entre blocs).

Dangers pour les usagers

Chutes de blocs.

Risques pour l'excavation

Généralement aucun sauf si la couverture est très mince.
Agrandissement naturel de la section.
Dommages aux équipements.

Surveillance

Lors du nettoyage des blocs tombés, noter les PM des chutes de blocs – noter leur fréquence.
Contrôles de routine plus fréquents.

Remèdes

Purges périodiques-préventives associées au minimum à du boulonnage.
Béton projeté, avec treillis soudé épinglé au terrain.

Observations

Voir aussi fiche 5 (Plaques ou bancs fléchis).

Informations complémentaires

C'est un désordre fréquent qui se rencontre d'abord dans les massifs stratifiés, dans les zones du profil en travers où la stratification tangente l'intrados. Cette situation peut aussi apparaître dans des roches métamorphiques fortement schistosées, dont le débit en plaques apparaît nettement à l'intrados.

Le niveau de risque est bien sûr lié à l'orientation des couches par rapport à la direction du tunnel, mais aussi à la superficie de la dalle visible, sa fracturation et la présence d'interbancs argileux ou marneux.

Un banc de roche horizontal en calotte se comporte comme une poutre sur appuis simples. Malgré sa rigidité apparente, il arrive à fluer avec le temps, et peut se casser au niveau des microdiscontinuités préexistantes. Après la rupture et la chute de l'élément, les racines du banc de part et d'autre ont été fragilisées et sont potentiellement instables; on est alors dans le cas de la fiche « blocs lâchés ».

Si le banc (calcaire, le plus souvent) est très homogène et épais (supérieur au mètre), ce type de désordre a peu de chances d'apparaître pour des dimensions d'excavation courantes en tunnels routiers.

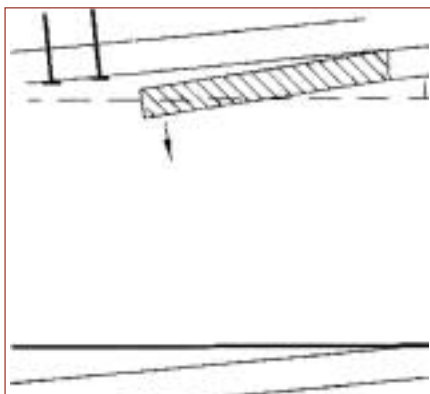


Le bloc tombé sur les tôles indique l'affaiblissement de l'extrémité d'une strate calcaire. La présence de deux discontinuités verticales et humides sur les côtés constitue une situation potentiellement dangereuse à long terme pour l'ensemble de la partie rocheuse centrale

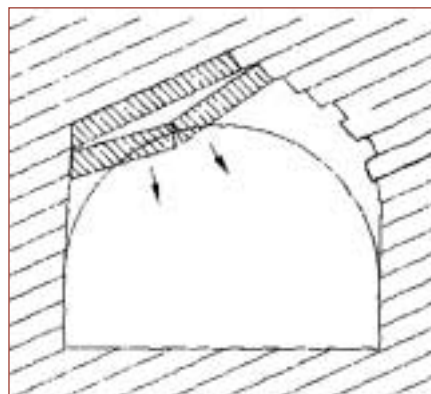


Plaques décollées inclinées de 45° en rein de tunnel

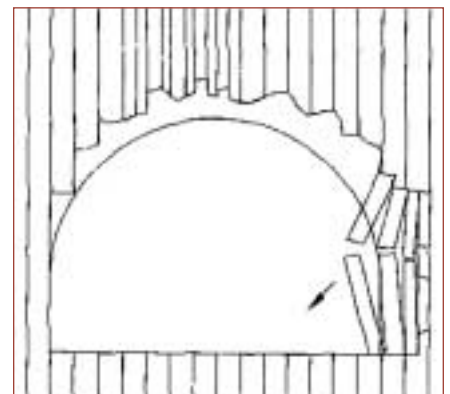
Plaques ou bancs fléchis - Les volumes unitaires peuvent être importants en roche dure, peu fracturée



Pendage sub-horizontale
Fléchissement en calotte (coupe longitudinale)



Pendage oblique
Fléchissement et rupture en rein



Pendage vertical
Flambement et rupture en piedroit

Description (aspect visuel du désordre)

Strates ou plaques de grandes dimensions décollées du massif, fléchies, interbancs ouverts, pendages nuls ou très faibles. Les emplacements de plaques déjà tombées se repèrent par des zones plus claires.

Méthodes d'examen

Examen depuis le bas, avec éclairage puissant (méthode peu fiable).
Examen rapproché, auscultation au marteau (réponse sonore de l'objet).

Paramètres à relever

Épaisseur moyenne des plaques – ouverture des joints ou fissures (en mm) – déplacements relatifs des éléments.
Estimation des volumes unitaires, d'un volume global (en dm^3 ou m^3), d'une surface (m^2).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Altérabilité de la roche, présence d'argile et d'humidité dans les discontinuités.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Origine structurale, éventuellement aggravée par le déroctage ou la forme de l'excavation.
Banc horizontal (en calotte), fissuration de la dalle (affaiblissement).

Conséquences, évolutions possibles

Rupture de la plaque apparente et chute de masses parfois importantes.
Création progressive de hors profils.

Dangers pour les usagers

Chute des plaques.

Risques pour l'excavation

Généralement aucun sauf si la couverture est très mince.
Agrandissement naturel de la section.
Dommages aux équipements.

Surveillance

Noter l'apparition de fissures, de chutes de petits blocs annonciateurs d'évolution.
Contrôles de routine plus fréquents.

Remèdes

Purges périodiques et préventives.
Au delà d'un certain volume, boulonnage, revêtement ancré.

Observations

Voir aussi fiche 4 (Masses ou blocs lâchés).

Informations complémentaires

On appelle «culot de tir» la zone d'explosion de la charge destinée au déroctage. On la trouve à la surface d'une excavation, à l'extrémité des «cannes de tir» qui sont la trace des forages destinés à la mise en place des charges.

Dans de nombreux tunnels anciens non revêtus, on a pu constater à l'extrémité des cannes de tir des auréoles instables affectées de nombreuses fissures rayonnantes.

Ce type d'instabilité peut être attribué à une mauvaise orientation du forage, à une purge incomplète de l'excavation après les tirs. Ce désordre affecte rarement la totalité de l'intrados et il est indépendant de la nature de la roche qui peut être de très bonne qualité.



Calcaire dérocté au début du siècle.
On distingue les fractures rayonnantes autour du forage de tir;
l'ensemble de la roche est désorganisé et instable

Description (aspect visuel du désordre)

Fissures rayonnantes autour d'un forage de tir à l'explosif.

Méthodes d'examen

À rechercher autour (ou à l'extrémité) de certaines « cannes de tir » visibles sur le parement.
Examen visuel – auscultation marteau.

Paramètres à relever

Étendue – volumes unitaires (global) des blocs instables.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Extension du désordre à toute la surface de l'excavation ou bien localisé.
Forte fracturation originelle de la roche – profil en travers défavorable.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Déroctages anciens – fort écart angulaire des forages de tir par rapport à l'axe – purge incomplète après le tir.

Conséquences, évolutions possibles

Fréquentes instabilités de blocs (forte décohésion évolutive de l'excavation).

Dangers pour les usagers

Chutes de blocs.

Risques pour les structures

Faible à nul.
Dommages aux équipements.

Surveillance

Examen visuel – fréquence des chutes de débris ou de blocs.

Remèdes

Purges périodiques.

Observations

Voir aussi fiche 4 (Masses ou blocs lâchés).

Informations complémentaires

Les karsts sont le résultat des phénomènes de dissolution et d'entraînement rencontrés dans les massifs calcaires : élargissement des diaclases et des joints, création de cavités ramifiées pouvant être nombreuses et importantes, mais dont la répartition spatiale n'est jamais entièrement connue. La qualité du terrain au voisinage du karst n'est pas modifiée par le processus.

Certaines roches comme le gypse peuvent aussi renfermer de telles cavités de type karstique. À la différence d'un massif calcaire, la dissolution y est beaucoup plus rapide et peut alors conduire à la formation de fontis au dessus du tunnel mais aussi sous le radier. Il n'y a pas d'exemples de tels désordres sur le réseau routier national.



Karst rempli de matériaux mal consolidés
Protection contre les chutes de matériaux par IPN



Conduit ouvert débouchant en calotte d'un tunnel non revêtu; on distingue les traces d'écoulements temporaires mêlés d'argile rouge

Les karsts recoupés par les tunnels ont pu être plus ou moins comblés par des matériaux extérieurs, mais certains conservent des circulations d'eau de régimes variables souvent liés aux précipitations.

Les conduits karstiques visibles à la surface des tunnels non revêtus sont généralement de petite dimension et n'ont pas toujours fait l'objet de protections ou de drainage.

Leur position par rapport à la voûte peut introduire une fragilisation locale de l'excavation (formation de ponts de roche fragiles dans le cas où un conduit tangente l'intrados).

Outre les cavités karstiques naturelles, certains tunnels anciens recoupent ou tangentent d'anciennes cavités créées par l'homme comme les carrières, ardoisières, canaux divers, galeries de reconnaissance, etc. N'ayant pas toujours été confortées ou remblayées, leur évolution généralement mal connue peut affecter la stabilité du tunnel proche. Il convient de les rechercher (archives, mémoire), de les visiter quand cela est possible, de les explorer par forages et vidéo-endoscopie.

Description (aspect visuel du désordre)

Karst : cavité ou conduit naturel formé par dissolution du calcaire. Ses dimensions peuvent être décimétriques à pluri-métriques. Certaines discontinuités naturelles du massif peuvent être « karstifiées » (formes adoucies par la dissolution sur les épontes*, présence d'argile rouge de décalcification).

Cavité : excavation d'origine humaine, non revêtue, ancienne et abandonnée, recoupée ou très proche du tunnel (carrière souterraine, ouvrage militaire, galerie).

Vide naturel extensif se formant au sein d'un terrain peu cohérent par éboulement et entrainement des fines par des circulations d'eau continues.

Méthodes d'examen

Examen visuel s'il débouche en tunnel (son exploration n'entre pas dans le cadre d'une inspection) – étude des archives de construction afin de savoir si des cavités peuvent être masquées par le revêtement.

Paramètres à relever

Forme et extension visibles à la surface de l'excavation (tunnel non revêtu) – nature du remplissage éventuel et stabilité – dimensions (quand il est accessible sans danger ni moyen particulier) – stabilité – mesure du débit en cas de circulation d'eau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Connaissance de débouçages antérieurs – dolines* en surface – affaissements de chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Dissolution du matériau (calcaire, gypse) par les circulations d'eau internes du massif.

Conséquences, évolutions possibles

Débouçages de volume important dans la partie circulée d'un matériau de remplissage existant ou amené par les eaux (ces phénomènes brutaux peuvent endommager un revêtement fragile) – effondrement localisé de la chaussée.

Dangers pour les usagers

Le danger existe si le débouché du karst n'est pas sécurisé (tunnels anciens non revêtus).

Chutes de matériaux et/ou venues d'eau subites et violentes – risque accru si le karst est en calotte.

Risques pour les structures

Si un revêtement existe au droit du vide, affaiblissement, voire rupture de celui-ci si le débouçage est massif (karst) ou si la cavité proche s'agrandit en direction du tunnel (éboulements extensifs).

Surveillance

Karst débouchant : surveiller la fréquence et l'abondance des chutes de matériaux.

Karst ou cavité cachée par un revêtement : forages endoscopés.

Remèdes

Protection par grillage ou grille purgeable (contre les chutes de blocs présents dans le remplissage).

Drainage surdimensionné et obturation armée.

Grands karsts ou cavités : traitements spécifiques.

Observations

* *Éponte* : chacune des surfaces formant la discontinuité. * *Doline* : dépression circulaire de modelé karstique.

Informations complémentaires

Les fissures longitudinales se développent sensiblement selon une génératrice du tunnel, et peuvent se situer pratiquement à tous les niveaux du profil en travers. Les zones de fissures matérialisent la position des rotules dans la déformation du profil en travers.

Maçonneries

Ce type de fissure se manifeste presque exclusivement dans les joints qui s'ouvrent sous l'effet de la déformation ; le mortier est souvent présent.

Localisées en calotte ou en clé, elles sont le signe d'un aplatissement du profil, alors qu'un pincement (ou un méplat latéral) les fera apparaître en naissances ou en reins.

Bétons

Le plus souvent, une fissure d'origine pathologique présentera une ouverture importante (supérieure à celle liée au retrait classique), un désaffleurement et des fracturations locales des lèvres.

À l'origine, elle pourra s'exprimer sur une fissure de retrait préexistante, réactivée par le processus de déformation, ou sur une reprise de bétonnage.

Une action du terrain encaissant peut se manifester aussi au niveau de la chaussée (fissures axiales, soulèvements, affaissements) nécessitant des réparations locales fréquentes.



Fissure longitudinale consécutive à une déformation de la maçonnerie (méplat) attestée par les traces de frottement des véhicules. Le mortier est toujours présent sur une lèvre de la fissure



Fissure longitudinale en béton coffré liée à une déformation du revêtement sous la poussée du terrain encaissant. La fissure s'exprime le long d'une reprise de bétonnage

Description (aspect visuel du désordre)

Leur plan moyen est parallèle à l'axe du tunnel.

Maçonnerie : elles suivent généralement les joints de mortier (ouverture des joints d'assise).

Béton coffré : les ouvertures peuvent être plus grandes que celles liées au seul retrait.

Méthodes d'examen

Examen visuel rapproché.

Paramètres à relever

Nombre de fissures, extension (PM début, PM fin) , ouverture, désaffleurement, rejet – désordres au niveau des lèvres.

Maçonnerie : noter si la fissure affecte les moellons ou si elle les contourne en restant dans les joints.

Bétons : vérifier si la fissure affecte un seul ou plusieurs plots consécutifs.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Déformations du revêtement – zones sonnantes le creux – moellons écaillés – résistance des moellons et mortiers, ou du béton.

Fissuration anormale ou déformations en chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Fissure d'origine pathologique liée à une évolution du revêtement, avec ou sans influence du terrain encaissant en contact – un revêtement altéré, des vides extrados sont des facteurs aggravants.

(En béton, ne pas confondre avec une fissure de retrait).

Conséquences, évolutions possibles

Fragilisation des abords immédiats de la fissure, puis de la voûte.

Ouverture progressive en cas de déformation du profil.

Dangers pour les usagers

Faible à nul, en cas de fissure isolée et peu ouverte.

Risques pour les structures

Affaiblissement.

Surveillance

Examen visuel (fréquence à adapter à l'importance du phénomène).

Pose de fissuromètres tridimensionnels et mesures régulières – mesures de déformations du profil (convergences relatives).

Remèdes

Aucune action à entreprendre tant que l'ensemble de la structure ne montre aucun signe de déformation rapide ou d'instabilité.

Observations

Voir aussi fiches 20 (*Aplatissement - pincement, schémas*), 24 (*Fissures de retrait*).

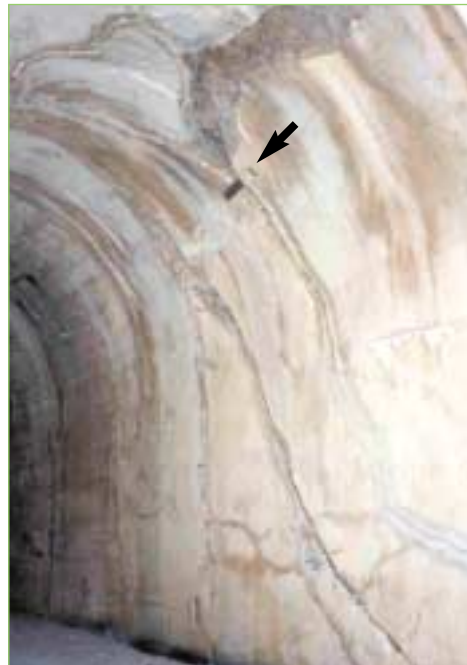
Informations complémentaires

La fissuration oblique, sous forme d'une fissure isolée ou de plusieurs fissures en relais, traduit le plus souvent un mouvement de torsion de la voûte. Les fissures obliques présentent, soit un tracé régulier, soit un tracé résultant de la combinaison de fissures transversales et longitudinales (cas où la fissure suit les joints d'une maçonnerie sans traverser les moellons).

C'est un désordre préoccupant, car il peut constituer l'indication d'un problème grave pour la structure (basculement d'une tête, tassement de fondation, glissement du versant) ou en section courante (gonflement, fluage, faille active).

En béton coffré non armé, la fissuration pourra s'exprimer au départ sur une fissure de retrait préexistante, réactivée par le processus de déformation. Par la suite, elle présentera une ouverture importante (supérieure à celle liée à un retrait classique), un désaffleurement et des fracturations locales des lèvres.

Une action du terrain encaissant peut se manifester aussi au niveau de la chaussée (fissures, soulèvements, affaissements) nécessitant des réparations locales fréquentes.



Réseau de fissures obliques dans une voûte en béton déformée par une poussée du terrain de couverture. Un morceau de béton est déjà tombé par rupture en rein. La flèche indique un fissuromètre

Description (aspect visuel du désordre)

Leur plan moyen est oblique par rapport à l'axe du tunnel. Il y a rarement une seule fissure, mais souvent plusieurs se relayant.

En maçonnerie : elles suivent généralement les joints de mortier ce qui leur confère un tracé en « marches d'escalier ».

En béton coffré : les ouvertures peuvent être plus grandes que celles liées au seul retrait.

Méthodes d'examen

Examen visuel rapproché.

Paramètres à relever

Nombre de fissures, extension (PM début, PM fin) , ouverture, désaffleurement, rejet – désordres au niveau des lèbres.

Maçonnerie : vérifier si la fissure affecte les moellons ou si elle les contourne dans les joints.

Bétons : vérifier si la fissure suit ou non une reprise de gachée.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Maçonnerie : déformations du revêtement – zones sonnantes le creux – moellons dégradés.

Maçonnerie et béton coffré : formation de panneaux instables si des fissures sont sécantes.

Fissuration des bordures et trottoirs, fissures ou déformations en chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Fissure d'origine pathologique, souvent liée à une action du terrain – déformation de la voûte en torsion ou cisaillement oblique par rapport à l'axe. Un revêtement altéré, des vides extradados sont des facteurs aggravants.

(En béton, ne pas confondre avec une fissure de retrait).

Conséquences, évolutions possibles

Fragilisation des abords immédiats de la fissure – formation de petits panneaux instables situés entre plusieurs fissures en relai.
Rupture de la structure.

Dangers pour les usagers

Faible à nul, en cas de fissure isolée et peu ouverte.

Risques pour les structures

Affaiblissement, voire ruptures locales.

Surveillance

Examen visuel (fréquence à adapter à l'importance du phénomène).

Pose de fissuromètres tridimensionnels et mesures régulières – mesures de déformations du profil (convergences relatives) – nivellements.

Remèdes

Aucune action à entreprendre tant que l'ensemble de la structure ne montre aucun signe de déformation ou d'instabilité.

Observations

Informations complémentaires

Située sensiblement dans un plan perpendiculaire à l'axe de la voûte, une fissure transversale peut être unique et continue, ou apparaître comme une série de fissures se relayant.

On devra s'attacher à déterminer si elle apparaît sur une discontinuité d'origine (reprise de maçonnerie, harpe de liaison), ou si elle résulte d'une déformation ultérieure de l'ouvrage.

Ce type de fissure peut se manifester à proximité immédiate d'une tête (changement d'épaisseur du revêtement, tassements) mais aussi en section courante (influence du massif, faille).

En béton coffré non armé, elle pourra s'exprimer au départ sur une fissure de retrait préexistante, réactivée par le processus de déformation. Par la suite, elle présentera une ouverture importante (supérieure à celle liée à un retrait classique), un désaffleurement et des fracturations locales des lèvres. Une grande continuité au sein de l'anneau est un bon indicateur de fissuration structurelle.

Une action du terrain encaissant peut se manifester aussi au niveau de la chaussée (fissures, soulèvements, affaissements) nécessitant des réparations locales fréquentes.



Fissure transversale couplée à une fissure oblique

Description (aspect visuel du désordre)

Leur plan moyen est perpendiculaire à l'axe du tunnel – elles peuvent affecter tout ou partie du profil.
En maçonnerie, elles suivent généralement les joints de mortier, ou les reprises entre anneaux (harpes de liaison*).*
En béton coffré, les ouvertures peuvent être plus grandes que celles liées au seul retrait.

Méthodes d'examen

Examen visuel rapproché.

Paramètres à relever

Nombre de fissures, extension, ouverture, désaffleurement, rejet, désordres au niveau des lèvres.
Maçonnerie : noter si la fissure affecte les moellons ou si elle les contourne en restant dans les joints.
Béton coffré : une telle fissure est plus grave en plein anneau bétonné qu'au droit d'un joint transversal.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Déformations du revêtement – zones sonnantes creux – moellons dégradés.
Fissuration des bordures et trottoirs, fissures ou déformations en chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Maçonnerie : défaut assez courant des harpes de liaison – déformation ou changement d'épaisseur du revêtement.
Béton coffré : cisaillement du revêtement.
Revêtement altéré, terrain encaissant évolutif, défauts de butée entre voûte et terrain sont des facteurs aggravants.
(En béton, ne pas confondre avec une fissure de retrait).

Conséquences, évolutions possibles

Fragilisation des abords immédiats de la fissure.
Ouverture progressive en cas de déformation de la structure.

Dangers pour les usagers

Faible à nul, en cas de fissure isolée et peu ouverte.

Risques pour les structures

Affaiblissement.

Surveillance

Examen visuel (fréquence à adapter à l'importance du phénomène).
Pose de fissuromètres tridimensionnels et mesures régulières – mesures de déformations du profil (convergences relatives).

Remèdes

Aucune action à entreprendre tant que l'ensemble de la structure ne montre aucun signe de déformation ou d'instabilité.

Observations

Voir aussi fiche 24 (Fissures de retrait).

* Harpe de liaison : joint de reprise vertical entre deux anneaux de maçonnerie de moellons.

Informations complémentaires

Principe d'investigation lors d'une inspection détaillée

Il repose sur la réponse sonore du matériau au choc du marteau. La démarche doit respecter les 3 étapes suivantes :

- délimiter la zone par martelage et la reporter sur le levé de voûte.
Dans une maçonnerie, la voûte peut sonner creux (la structure est mise en vibration) mais aussi les moellons de mauvaise qualité (matériau). Le son est différent.
- tenter par l'auscultation marteau de déceler la partie de zone la plus « critique ».
En première approche, plus le son est grave, plus le revêtement est mince ou désorganisé sur une grande surface.
- rechercher les défauts ou désordres associés.

À la surface d'une excavation

Suivant la taille et la répartition des zones sonnant le creux, on procédera de façon ciblée ou statistique.

Dans une maçonnerie

Les piédroits doivent être sondés systématiquement, ce qui donnera une première idée sur la compacité des structures. Dans la mesure du possible, la totalité de la voûte devrait être sondée (de façon statistique) et particulièrement la calotte dont on sait qu'elle est généralement mal bloquée au terrain.

Dans du béton coffré

Le sondage au marteau doit être réalisé **même si le béton ne montre aucun défaut apparent**, car il peut mettre en évidence une faible épaisseur de béton (tout particulièrement en calotte où le clavage est souvent mal réalisé).

À titre d'exemple (et sur des cas vérifiés), un son très caverneux dans un béton récent indique une épaisseur inférieure à 10 cm. Des zones sonnant le creux peuvent être trouvées en tous points du profil en travers; elles peuvent être le signe d'une déchirure ou d'un déplacement de la feuille d'étanchéité vers l'intrados, d'une faible épaisseur au droit d'un en-profil, ou tout simplement d'un mauvais clavage. On s'attachera alors à délimiter précisément toutes ces zones qui peuvent être très étendues (quelques dizaines de m²).

Dans du béton armé

Située en calotte ou en reins, une zone sonnant creux peut indiquer une mauvaise répartition du béton au sein des nappes d'armatures, voire un défaut de béton (malfaçon).

Dans du béton projeté

Les zones sonnant le creux sont fréquentes et tiennent soit à des défauts d'adhérence soit à la mauvaise qualité du support rocheux. La présence conjointe de fissures ouvertes est un facteur nettement aggravant, définissant un désordre dont il faut rechercher l'origine.



Fenêtre de reconnaissance ouverte sur une zone sonnant fortement le creux. Vide extradados de 27 cm par défaut de bétonnage



Vide d'origine à l'extrados d'un béton très altéré. Le revêtement sonnant creux est instable autour de l'ouverture

Description (aspect visuel du désordre)

Une zone sonnante le creux n'est pas un risque en soi, mais plutôt l'indice d'un vide proche de l'intrados, d'un défaut ou d'un désordre au sein d'un matériau ou d'une structure, qu'il faut s'attacher à qualifier.

Méthodes d'examen

Essentiellement par le martelage du revêtement ou de la roche, en s'attachant à interpréter la réponse sonore du support (clair, caverneux).

Paramètres à relever

Position dans la voûte, surface affectée (m²) – type de sonorité.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Déformation du revêtement (maçonneries); fissuration plus dense ou anormale (bétons).

Tous défauts indiquant une faiblesse de la voûte (altération, fissures, venues d'eau nouvelles..).

Masses rocheuses décollées.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

a. **Maçonneries** : mauvaise cohésion (d'origine ou d'altération), revêtement mince non ou mal bloqué au terrain, exfoliation, écaillage.

b. **Béton coffré, béton armé** : mauvais remplissage (calotte), étanchéité déplacée ou déchirée (aléatoire), faible épaisseur, écaillage, éclatement sur fers.

c. **Béton projeté** : mauvaise adhérence au support, support altéré.

d. **Rocher** : décompression naturelle.

Conséquences, évolutions possibles

abc. Peu ou pas d'évolution en l'absence d'autres désordres.

d. Chute de masses de roche.

Dangers pour les usagers

Ceux associés aux désordres constatés.

Risques pour les structures

a. Fonction de la gravité des défauts associés qui peuvent évoluer dans le temps.

b. Vieillesse plus rapide de la zone affaiblie. Pas d'évolution connue (défaut trop récent avec les feuilles d'étanchéité).

c. Associé à des fissures évolutives, indiquent une action du terrain.

d. Aucun.

Surveillance

Surveiller les défauts ou désordres éventuellement associés constatés lors de l'IDP.

Remèdes

Bétons récents : le vide dû à un défaut de bétonnage (malfaçon) peut être injecté (cf. photo).

Revêtements anciens : toutes les zones sonnantes le creux ne relèvent pas de réparations. À définir en fonction de reconnaissances complémentaires.

Observations

Voir aussi fiche 41 (Feuille d'étanchéité).

Informations complémentaires

La rupture d'un revêtement (ou son amorce) est une alerte sérieuse. La ruine est la conséquence ultime d'une convergences de désordres qui n'ont pas été vus et traités en temps voulu.

Dans les maçonneries

La ruine est souvent précédée par l'apparition d'un ventre avec fissures qui s'intensifie au cours du temps. La maçonnerie s'effondre sous son propre poids (en piédroits) ou sous le poids du blocage (voûte), en dehors de toute action du terrain. L'origine d'un tel accident réside le plus souvent dans une altération complète des mortiers, non détectée à cause d'un manque de surveillance et d'entretien.

Quand de l'écaillage est associé aux ventres (ou méplats, ou aplatissements), alors que les mortiers sont encore solides, le problème est plus grave car le terrain est en cause. Les zones écaillées par la déformation prennent un aspect broyé avant la ruine.

Dans les bétons coffrés

La ruine directe est beaucoup plus rare. Des ruptures franches apparaissent, sous forme de **fissures avec désaffleurement**, délimitant des panneaux rigides qui restent en place par frottement mutuel et qui laissent le temps d'intervenir. La cause est toujours extérieure à l'ouvrage.

Dans les bétons projetés non armés de treillis

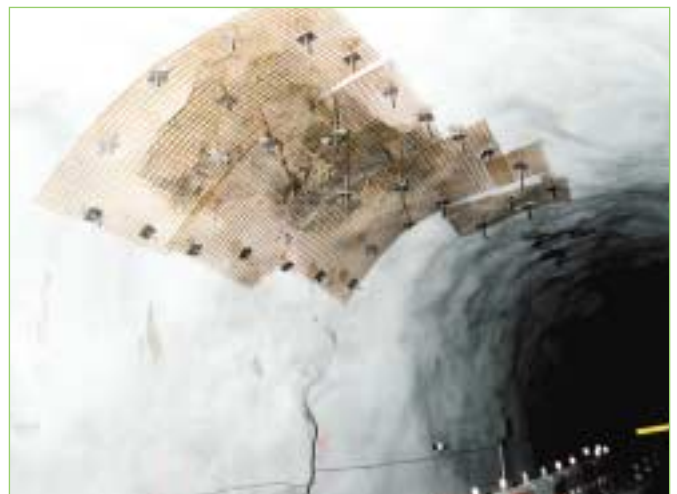
Une rupture peut se produire par poussée locale (gonflement) du terrain, en s'amorçant par une ou plusieurs fissures. La vitesse d'évolution est plus grande qu'en béton coffré, et des chutes de plaques peuvent survenir rapidement.



La moitié de la voûte est tombée par écrasement du piédroit, constitué de moellons très exfoliés et peu résistants. La ruine s'était annoncée par un ventre du piédroit, non conforté à temps. Le terrain n'était pas en cause.



Rupture d'une voûte en béton coffré armé sous l'action de sollicitations trop élevées



Un gonflement de marnes a rompu un revêtement de béton projeté sans treillis soudé (réparation en cours)

Description (aspect visuel du désordre)

Signes annonciateurs :

a. **Maçonneries** : fissures très ouvertes, écaillages prononcés, chutes de moellons, disparition du mortier, déformations du profil.

b. **Bétons** : fissures très ouvertes, lèvres décalées, écaillage fort du béton, panneaux basculés.

Méthodes d'examen

Examen visuel, auscultation marteau.

Paramètres à relever

Présence de panneaux instables.

Tracé, fréquence, caractéristiques des fissures.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Altération des matériaux, venues d'eau, nature du terrain encaissant ou du remblai éventuel (têtes).

Ventre, aplatissement, méplat, pincement (localisation, amplitude).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Action du terrain encaissant, surcharge de la voûte, altération totale du revêtement.

Conséquences, évolutions possibles

Accélération et/ou extension du phénomène.

Dangers pour les usagers

Risque de chute d'un grand volume d'éléments sur la chaussée.

Risques pour les structures

Majeur, par effondrement.

Surveillance

Examen visuel.

Mise sous haute surveillance.

IDP rapprochés.

Remèdes

Confortations ou reconstruction.

Observations

Informations complémentaires

L'épaufrure affecte la continuité du matériau et traduit le fait qu'un fragment s'en est détaché.

On réservera donc ici le terme d'épaufrures aux défauts affectant les arêtes vives des éléments de structure (moellons, bétons coffrés), et dus :

- soit à des chocs accidentels ;
- soit à un problème au décoffrage ;
- soit enfin à une altération du matériau (une arête vive de moellon ou de béton gelée prendra un aspect arrondi qui peut être qualifié d'épaufrure).

Un traitement n'est à entreprendre que si l'ampleur de la dégradation compromet la stabilité de la structure, ou si des fers ont été mis à nu : passivation, ragréage.



Un élément préfabriqué mince est épaufré par un choc (traces de frottements)



Épaufrure à la base de l'appui d'une dalle de ventilation, survenue probablement lors du décoffrage. À gauche, subsiste une écaille non encore tombée

Description (aspect visuel du désordre)

On appelle épaufrure la cicatrice laissée par le départ d'un fragment de revêtement au droit d'une partie saillante ou d'une arête vive.

Méthodes d'examen

Examen visuel rapproché.

Paramètres à relever

Position dans la structure, dimensions de l'épaufrure par rapport à la structure affectée.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissures, signes d'altération, traces de frottements ou de chocs fréquents, éléments instables encore en place autour de la partie disparue (écailles).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Chocs accidentels en service ou blessures de chantier (lors du décoffrage, ou de la manutention pour des éléments préfabriqués). Altérations du matériau (gel).

Conséquences, évolutions possibles

Extension et affaiblissement (si la cause semble être l'altération).
Instabilité de la structure affectée (si la cause est accidentelle et la structure légère).
Dans le cas de béton armé, les armatures sont exposées à la corrosion.

Dangers pour les usagers

Généralement nul sauf si la structure a été fragilisée.

Risques pour les structures

Nul à fort (par affaiblissement de la résistance d'éléments minces en béton armé).

Surveillance

Visuelle.
Noter la répétition des chocs aux mêmes endroits

Remèdes

Aucune action particulière si la structure n'est pas dangereusement affectée.
Les éléments résiduels seront purgés.

Observations

Ne pas confondre avec les « éclatements sur armatures » (fiche 30), bien qu'il y ait parfois convergence d'aspect. La cause est différente et l'évolution plus préoccupante.

Informations complémentaires

L'alvéolisation se manifeste surtout à la surface des moellons gréseux, dont la résistance à l'altération est fonction de celle du liant originel, ou des moellons de dolomie. La micro-porosité parfois importante des premiers les rend d'autant plus sensibles aux variations d'hygrométrie et de température. Il y a donc une perte d'éléments (sable) au dépens des zones les plus tendres, au cours des transferts de vapeur ou d'eau à la surface du matériau, ou à l'occasion de mouvements capillaires. Ce processus physique peut être accompagné de faibles actions chimiques s'exerçant au niveau du ciment naturel (dissolution du ciment calcaire des grès ou molasses gréseuses, dédolomitisation des grains par agression sulfatée pour les dolomies).



Le terme d'«érosion éolienne», parfois employé, est impropre, bien qu'il puisse y avoir convergence d'aspect. Ce type d'érosion est le fait de particules sableuses abrasives transportées par le vent, conditions qui n'existent pas en tunnel. En revanche, le rôle des mouvements d'air y est majeur dans les variations de température et d'humidité de l'intrados.

Ce défaut de la pierre, rarement généralisé et profond (du moins dans les tunnels routiers inspectés), est sans aucune conséquence pour la structure. Il peut préexister en affleurement naturel.

Description (aspect visuel du désordre)

Le moellon (ou la brique) apparaît en creux entre des joints de mortier mis en relief. Le fond des cupules ou de la cavité est toujours propre et sain.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Profondeur moyenne de l'alvéolisation – surface d'intrados concernée.
Sonder les moellons au marteau pour vérifier la compacité du revêtement.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Mauvaise qualité générale du revêtement.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Altération superficielle des pierres gréseuses ou dolomitiques : variations d'hygrométrie, faibles actions chimiques aux dépens du ciment naturel de la roche (phénomènes non spécifiques au milieu souterrain).
Briques de mauvaise qualité.

Conséquences, évolutions possibles

Extension latérale ou en profondeur

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Aucun, si le désordre reste superficiel et peu étendu.

Surveillance

Examen visuel, mesures éventuelles.

Remèdes

À n'envisager que si le désordre affecte localement la tenue de la voûte, ce qui est très rare.

Observations

Ne pas confondre avec « desquamation » (fiche 15) ou arénisation (altération interne d'une roche granitique).

Informations complémentaires

La desquamation est une altération des moellons en fines lamelles parallèles au parement, affectant les zones de moellons de nature semblable (souvent gréseux). Les pellicules décollées sont en général largement inférieures au centimètre et les débris pouvant tomber sont de masse très faible. En revanche, à partir de 1 cm d'épaisseur, on entre dans le domaine de l'exfoliation ([Fiche 16](#)).

Le processus de desquamation a pu être accéléré par des mortiers de rejointoiement moins perméables que les pierres ou le mortier d'origine ; les transferts de vapeur d'eau s'opèrent alors dans la pierre alors que le mortier d'origine plus perméable tendait à la protéger.

Le défaut (plutôt que désordre) est généralement discret et sans conséquence grave dans les tunnels routiers. Il est aggravé en présence d'eaux séléniteuses ou d'atmosphère fortement polluée par des gaz d'échappement.



La maçonnerie de moellons gréseux a subi un rejointoiement, déjà ancien, à l'aide d'un mortier riche en ciment et compact, qui a vraisemblablement accéléré, sinon initié le processus de desquamation, en déplaçant les transferts d'eau dans la pierre

Explication chimique de la desquamation

Elle se caractérise par une modification de la nature chimique du feuillet superficiel. Elle est liée à l'action de composés soufrés atmosphériques (fumées, gaz d'échappements, suies) qui forment avec l'eau des solutions acides. Les modifications chimiques de la couche superficielle sont dues aux mouvements de migration de ces solutions, tantôt de pénétration dans le moellon, tantôt de remontée à la surface avec évaporation et dépôt de sels (sulfate de calcium en particulier). La surface du moellon prend un aspect de chancre plus ou moins poudreux et imprégné de suies.

Ce genre de manifestation est typique des tunnels ferroviaires anciens (combustion de charbons productrice de composés soufrés) mais quasi inexistant sur les réseaux routiers.

Description (aspect visuel du désordre)

Forme d'altération limitée au moellon lui-même. Il apparaît feuilleté en surface, les feuillets étant fragiles et toujours d'épaisseur inférieure au centimètre (pellicule fine).

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Nature de la pierre – extension du phénomène (très localisé ou dispersé) – situation par rapports aux têtes du tunnel.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Sonder la zone au marteau afin de vérifier si le défaut est associé à des exfoliations.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Altération de la roche constitutive du moellon, par migrations de sels vers la surface.

Ce mécanisme est favorisé par la pose en délit des moellons, les venues d'eau périodiques, les cycles gel-dégel, les courants d'air violents.

Conséquences, évolutions possibles

Faibles à nulles.

Le processus de desquamation évolue par approfondissement lent.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Aucun.

Surveillance

Visuelle.

Remèdes

« Nettoyage » périodique éventuel.

Observations

Ne pas confondre avec « alvéolisation » (fiche 14).

Informations complémentaires

Le moellon présente parfois un parement intact. En profondeur, il est divisé par des plans de fissuration parallèles au parement, ce qui se traduit par un son creux à l'auscultation au marteau. L'épaisseur de chaque feuillet est supérieure au centimètre. Parfois, les feuillets sont tombés naturellement et l'intrados est parsemé de cavités plus ou moins étendues et profondes. La différence majeure avec l'écaillage d'origine mécanique réside dans le fait que ces feuillets sont très facilement purgeables, même à la main.

À l'examen visuel, il n'y a pas de modification pétrographique notable de la structure du feuillet. L'origine de l'exfoliation semble liée surtout à la mauvaise qualité intrinsèque de la pierre.

L'interprétation globale à l'échelle du tunnel peut être délicate. À titre d'exemple, un phénomène d'exfoliation de l'intrados peut très bien être initié par une mauvaise qualité de pierre, et accusé par l'existence de contraintes même modérées régnant dans le corps de la voûte, alors que ces mêmes valeurs de contraintes n'auraient aucune conséquence sur une maçonnerie de moellons plus résistants.

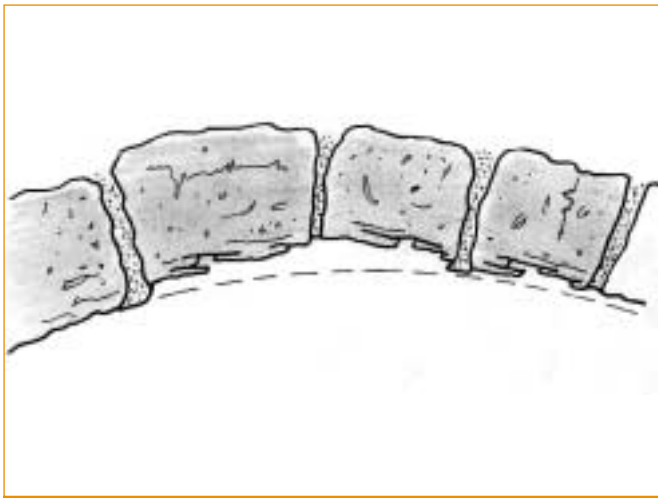


Schéma de l'exfoliation



Exfoliations de moellons de calcaire oolithique, fragiles et gélifs

Description (aspect visuel du désordre)

Type de désordre limité au moellon lui-même. Sous un aspect parfois intact, il y a formation de feuillettes d'épaisseur centimétrique ou plus, parallèles à l'intrados. La chute naturelle de certains feuillettes forme des cavités à la surface de la voûte.

Méthodes d'examen

Au stade peu avancé, seule l'auscultation au marteau permet de déceler le désordre. Si des fragments sont déjà tombés, le désordre apparaît clairement.

Les feuillettes sont facilement détachables, parfois naturellement instables.

Paramètres à relever

Nature de la roche (moellon) – étendue du phénomène (très localisé ou dispersé – évaluer la surface en m^2) – épaisseur moyenne des feuillettes – profondeur des cavités formées naturellement par chute des éléments.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Sonder la zone afin de vérifier si le désordre est extensif (latéralement) ou intensif (en profondeur).

Présence d'écaillage mécanique.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Mauvaise qualité mécanique du moellon, pose en délit, gel, variations de la température et du taux d'humidité, existence de faibles contraintes au sein du revêtement, causes non exclusives les unes des autres.

Rencontrée le plus souvent dans des moellons peu résistants, poreux, ou des briques de qualité moyenne.

La présence d'efflorescences sur les mortiers, le gel, sont des facteurs aggravants.

Conséquences, évolutions possibles

Extensions latérales et/ou en profondeur par coalescence de zones initialement isolées.

Dangers pour les usagers

Chute de plaques décimétriques.

Risques pour les structures

Amincissement du revêtement sur une surface importante.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Purges périodiques – chemisage en béton projeté sur treillis soudé si la réduction d'épaisseur de la maçonnerie devient significative.

Observations

Ne pas confondre avec « écaillage mécanique de moellons » (fiche 17).

Syn: délitage, délamination.

Informations complémentaires

La cause de l'écaillage est une mise en contrainte du moellon entre points durs, excessive vis à vis de ses caractéristiques mécaniques. Il se brise comme dans un essai de fendage entre pointes. Sa présence au sein d'un revêtement indique une mise en étreinte de celui-ci.

La partie superficielle des moellons est décollée et se détache en écailles de plusieurs cm d'épaisseur, affectant toute la largeur du moellon et restant en place. La différence avec une exfoliation est la forme conchoïdale (régulière, mais non plane) de la surface de rupture, et l'impossibilité de replacer exactement l'éclat quand on l'a purgé. Un écaillage débutant, invisible, se décèle au marteau par un son creux ou chantant. Si l'on insiste, l'éclat peut se détacher, et parfois de façon brutale.

Certains moellons ne présentent pas cette forme d'écaillage, mais des fissures caractéristiques d'écrasement générant des débris instables.

Les écaillages s'alignent le plus souvent sur une ou plusieurs rangées de moellons consécutifs.

Nota: l'écaillage mécanique est parfois qualifié aussi d'«éclatement de moellon».

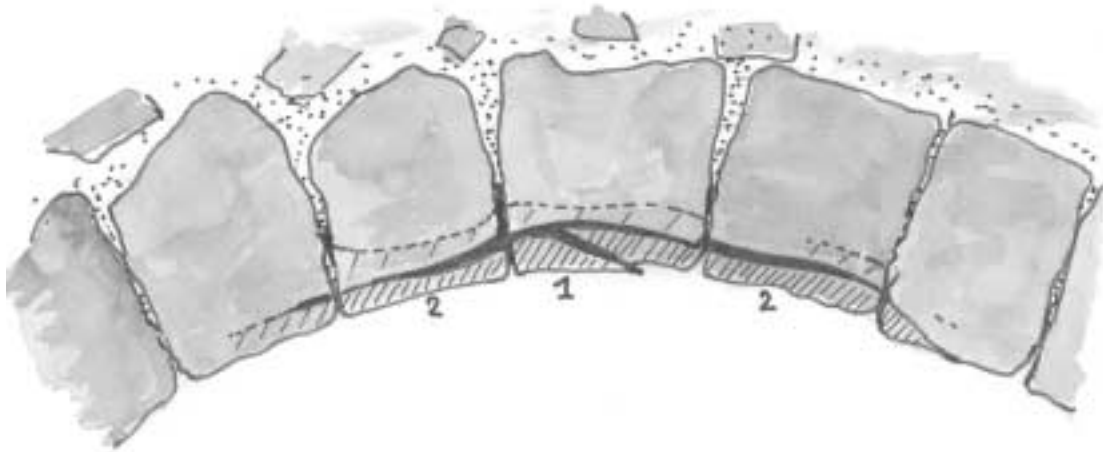


Schéma d'un écaillage de moellons en clé (voûte pincée)

On remarque l'absence de mortier entre les moellons qui sont en contact. La chute d'une écaille de type 1 déstabilise les écailles de type 2, auparavant coincées. Si la racine de l'écaille tombée sonne encore le creux, cela signifie que de nouvelles écailles sont en formation (pointillés)



Écaillage de moellons en clé

Les parties d'aspect lisse sont les cicatrices de départ des écailles dont l'épaisseur atteint 10 cm. On remarque l'absence quasi totale de mortier dans le sens longitudinal, ainsi qu'une écaille décollée toujours en place par coincement latéral



Écaillage de moellons en piedroit

L'écaille, décollée de 15 mm, n'est pas détachable à la main. Les moellons supérieur et inférieur sont en contact direct sans mortier

Description (aspect visuel du désordre)

Rupture du moellon (ou de la brique), formant une écaille centimétrique décollée et prise « en étau » entre les moellons (ou briques) adjacents. L'écaille est rarement purgeable à la main. La surface de rupture est nette, conchoïdale (non plane mais lisse) – le phénomène peut englober plusieurs moellons jointifs ainsi que leurs joints de mortier. C'est un désordre de la structure indépendant de la qualité des pierres (ou des briques).

Méthodes d'examen

Auscultation marteau (son « chantant » indiquant une mise en étreinte) – examen en lumière rasante.

Paramètres à relever

Extension du phénomène – localisation dans le profil en travers (clé, reins ou naissances) – épaisseur moyenne des écailles. Épaisseur moyenne des joints de mortier (les moellons écaillés sont souvent en contact direct dès l'origine).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Déformations du profil en travers – fissures – déjoints – désordres en chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Excès local de contraintes dans le revêtement, dépassant la résistance mécanique des moellons ou des briques.

Moellons mal assisés – déficit de mortier lors de la réalisation des lits horizontaux (moellons en contact).

Nota: le terme « écaillage » est à réserver exclusivement au désordre dont l'origine mécanique prépondérante est avérée.

Conséquences, évolutions possibles

Extensions latérales ou en profondeur.

Même s'il n'est pas associé à une déformation de la voûte (cas fréquent), le phénomène est critique.

Dangers pour les usagers

Risques de chutes d'écailles « expulsées » au fil du temps.

Risques pour les structures

Affaiblissement local du revêtement.

Garder à l'esprit l'hypothèse d'un début de mécanisme de rupture du revêtement.

Surveillance

Visuelle (écailles tombées) – noter les PM des chutes.

IDP rapprochées – mesures des déformations du profil – mesures des contraintes dans le revêtement.

Mise sous surveillance renforcée ou haute surveillance suivant les résultats des mesures.

Remèdes

Sécurité des usagers : purges fréquentes – pose de grillages de retenue.

Suivant le résultat de la surveillance et des mesures, une réfection par renforcement de la structure, voire reconstruction est parfois inévitable.

Observations

Ne pas confondre avec « exfoliation » (fiche 16).

Informations complémentaires

Le premier désordre induit pour les structures est le déjointoiement, précurseur de ruine s'il n'est pas traité à temps.

Les mortiers les plus anciens encore visibles dans les tunnels sont généralement clairs, signe qu'ils ont été confectionnés avec une chaux hydraulique. Celle-ci a été utilisée à peu près exclusivement dans la construction des voûtes de tunnels durant la deuxième moitié du XIX^e siècle. Des mortiers dits «bâtards» ont pu être utilisés aussi (2/3 de ciment Portland et 1/3 de chaux grasse). Les mortiers à base de ciment, plus tardifs, sont généralement plus sombres.

La proportion de mortier dans un volume de maçonnerie varie de 8 à 30% selon la qualité de l'appareillage des pierres; elle est sensiblement égale à 30% avec des briques.

Les mortiers anciens sont très sensibles aux agressions chimiques et sont le point faible d'une maçonnerie. Ils possèdent une porosité importante mais très fine, introduisant une succion capillaire forte par rapport à celle des moellons adjacents qui ont des pores plus importants; ils jouent un rôle «d'éponge» protecteur des pierres. Mais comme leur carbonatation est ancienne et profonde, ils sont très sensibles à toute attaque acide. Contrairement aux bétons, ils n'ont plus de réserve alcaline susceptible de les protéger ce qui explique leur désagrégation parfois complète.

Cela est attesté par les nombreux rejointoiements successifs visibles dans certains ouvrages.



Décomposition totale d'un mortier amorceur la ruine du piedroit. Le facteur aggravant est ici l'absence d'assise des moellons opus

Description (aspect visuel du désordre)

Le mortier est meuble et humide – il est parfois réduit à l'état de sable.

Méthodes d'examen

Examen visuel – investigation des joints au marteau (ou autre outil fin).

Paramètres à relever

Consistance, teinte – profondeur du déjointoiement associé – surface de revêtement affectée et position dans le profil.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Efflorescences blanches sur le mortier – venues d'eau – mauvaise qualité des moellons – déformations du profil – ventres – moellons descellés.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Dissolution du liant – attaque sulfatique.

Conséquences, évolutions possibles

Affaiblissement, voire ruine et chute d'une partie du revêtement.

Dangers pour les usagers

Chute d'éléments.

Risques pour les structures

Affaiblissement progressif.

Surveillance

Examen visuel.
Analyses d'eau et de mortiers.

Remèdes

Drainage, rejointoiements.
Reconstruction.

Observations

Voir aussi fiches 2 (Efflorescences), 19 (Déjointoiement), 28 (Altération des bétons)

Informations complémentaires

Le départ progressif du mortier des joints est un phénomène courant dans les maçonneries de tunnels.

Cette altération peut se développer à partir de l'intrados par dissolution progressive du liant, provoquant un recul du mortier dans le joint, qui n'est pas forcément très humide. Le mortier apparaît farineux en surface et son lent recul s'apparente à l'alvéolisation évoquée pour les pierres gréseuses. Le mortier visible reste compact et dur. L'évolution de ce désordre léger est à surveiller.

Le plus souvent, l'altération des mortiers affecte toute l'épaisseur de la maçonnerie et provient du lessivage par les eaux d'infiltration riches en CO_2 ou en sulfates. Le stade ultime est un sable, soit sec et pulvérulent, soit humide et pâteux, et l'appareillage est alors proche de la ruine.



Déjointoiement par dissolution, typique d'un manque d'entretien. Les cales en bois étaient probablement destinées à sécuriser un moellon ou à stopper d'anciennes arrivées d'eau ponctuelles. Les moellons, pourtant de bonne qualité, sont quasiment déchaussés

Ce désordre progresse beaucoup plus vite si les moellons sont mal assisés et les lits de mortier irréguliers ou trop épais.

Parfois aussi, des rejointoiements superficiels peuvent cacher un mortier totalement altéré, voire absent. Il est conseillé de vérifier ce point par quelques piquages au marteau.

Les processus sont cependant assez lents et laissent le temps de procéder à des investigations, puis des réparations, pour autant que l'on maintienne une surveillance régulière.

Description (aspect visuel du désordre)

Départ progressif du mortier des joints à l'intrados – le mortier encore en place peut être solide ou meuble, voire sableux.

Méthodes d'examen

Examen visuel – investigation au marteau afin de reconnaître la dureté du mortier.

Paramètres à relever

Surface affectée (m²) ou pourcentage de la surface intrados affectée – profondeur moyenne du déjointoiement en cm, ou affectation en 3 classes (de type : inférieur à 5 cm, supérieur à 5 cm, total).

Position dans le profil en travers.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Moellons ordinaires ou opus incertum, mal assisés – moellons descellés – venues d'eaux importantes – efflorescences fibreuses dans le mortier – zones sonnantes creux – déformations de voûte.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Dissolution superficielle du mortier – décohésion par attaque en profondeur par des eaux agressives.

Conséquences, évolutions possibles

Extension latérale et en profondeur d'autant plus que l'humidité est forte et permanente – risque de chute locale de moellon.

Dangers pour les usagers

Chute de moellons.

Risques pour les structures

Affaiblissement de la voûte – déformation, tassement.

Surveillance

Examens fréquents surtout si zone très humide – profondeurs et surfaces à estimer.

Remèdes

Drainage maximum, sablage et rejointoiements mécanique.
Injections de régénération du corps de maçonnerie.

Observations

Voir aussi fiche 18 (Altération des mortiers).

Informations complémentaires

Aplatissement

On réserve ce terme au désordre qui affecte la calotte de façon symétrique. On ne le voit bien que depuis une nacelle placée au ras de la clé de voûte.

On s'attachera toujours, par un examen approfondi, à rechercher la présence de désordres associés permettant de conclure soit à une déformation de construction, soit à une évolution pathologique. Cette dernière peut se révéler par des écaillages mécaniques de moellons en naissances ou en reins.

Pincement

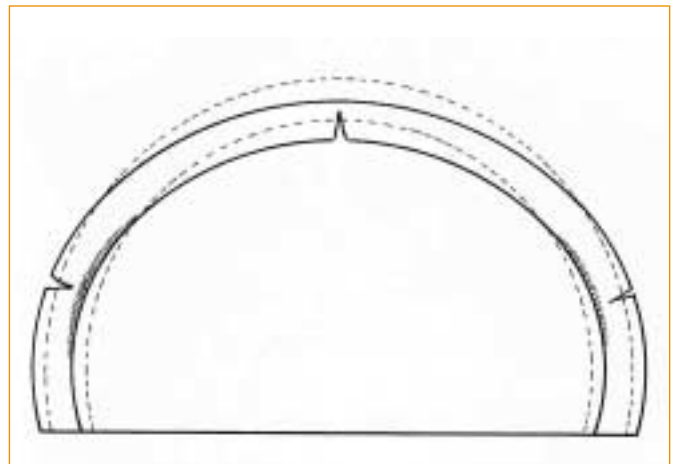
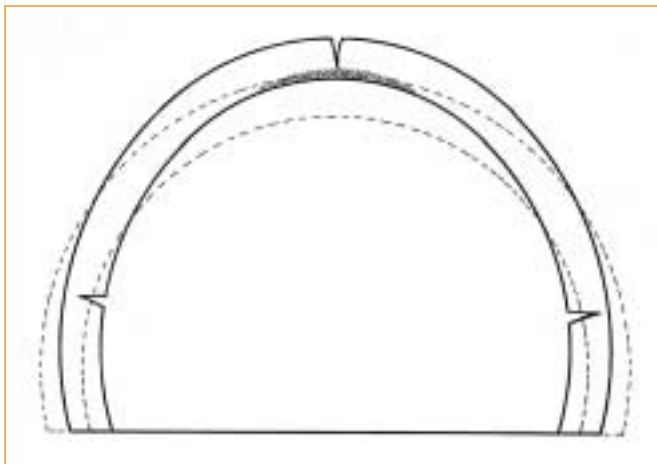
Le terme illustre un rapprochement symétrique des parements. Plus fréquent dans des profils très élancés, il apparaît facilement à l'œil nu depuis le sol. Des traces de frottements de poids-lourds permettent de le repérer très vite.

On recherchera alors la présence de joints ouverts en naissances ou en reins, ainsi que d'écaillage en clé de voûte.



Le pincement de clé, déjà réparé en béton coffré (ancien), se poursuit par écrasement des moellons de clé

Schémas simplifiés des déformations de revêtements



En pointillé: profil théorique. En trait plein: profil déformé.

Les zones hachurées indiquent les zones en compression, par rapport aux zones en extensions (fissures)

Description (aspect visuel du désordre)

- a. **Aplatissement** : augmentation du rayon de courbure de la partie supérieure de la voûte.
- b. **Pincement** : déformation en ogive de la partie supérieure de la voûte avec rapprochement des reins et remontée de la clé.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Localisation, extension longitudinale (noter les PM) et verticale, amplitude de la déformation (difficile à mesurer sans profilométrie).
Tenter de déceler si le désordre est d'origine (aucun autre défaut ou désordre), ou plus récent (forte probabilité de désordres associés).

Désordres ou défauts associés à rechercher

- a. Fissuration ouverte en clé, écaillage en naissances.
 - b. Fissuration ouverte en naissance, écaillage en clé.
- JointS ouverts, moellons descellés.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Déformations d'origine assez fréquentes dans les vieilles maçonneries.

- a. Diminution de la butée latérale, décohesion et appui du terrain sur la clé de voûte.
 - b. Forte contrainte horizontale, mauvais clavage en clé.
- Gonflement du terrain.

Conséquences, évolutions possibles

Accentuation des déformations, chutes ou écaillage de moellons, rupture.

Dangers pour les usagers

Généralement nul (déformation de construction) ; peut devenir fort en l'absence de surveillance (évolution rapide).

Dans ce dernier cas :

- a. Chute de moellons possibles
- b. Chute d'écailles depuis la calotte – réduction de largeur en reins (frottements de PL).

Risques pour les structures

Affaiblissement.

Surveillance

Examen visuel plus fréquent – profilométrie – mesures de déformation (convergences relatives) – mesures de contraintes.
Inspections détaillées plus rapprochées si évolution sensible.

Remèdes

Confortement par cintres avant renforcement par injection d'extrados, boulonnage, chemisage en béton projeté.
Reconstruction.

Observations

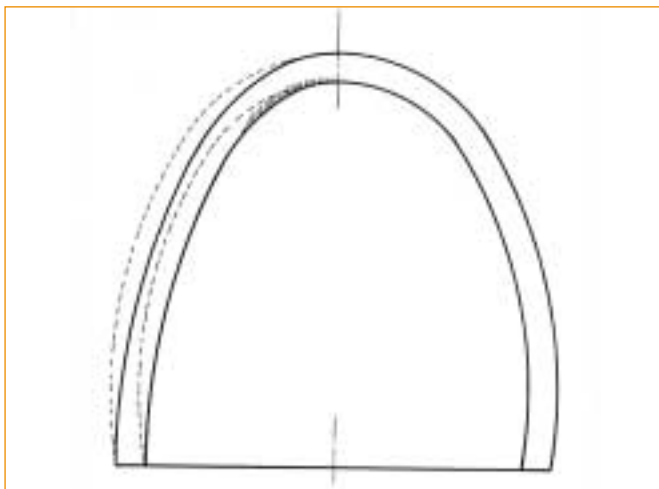
Voir aussi fiche 21 (Méplat).

Informations complémentaires

Bien que ce désordre puisse être assimilé à un « pincement » de la voûte, le terme de méplat a été introduit pour caractériser une déformation n'affectant qu'un seul côté du profil et sur une grande hauteur.

Ce désordre est connu dans les tunnels ayant un profil en ogive très élancé.

Il semble être le résultat de l'évolution d'un terrain hétérogène n'appuyant sur la voûte que d'un seul côté. Une déformation du coffrage d'origine n'est pas non plus à exclure, si l'examen et la surveillance ne décèlent aucun autre désordre évolutif.



En pointillé: profil théorique. En trait plein: profil déformé.
Les zones hachurées indiquent les zones en compression,
par rapport aux zones en extensions (fissures)



La partie claire (méplat) a perdu
sa courbure d'origine

Description (aspect visuel du désordre)

Déformation qui n'affecte qu'un seul côté de la voûte entre la chaussée et le rein, par augmentation du rayon de courbure ; dans les profils en travers en forme d'ogive, l'intrados apparaît presque rectiligne.

Méthodes d'examen

Observation visuelle rasante.

Paramètres à relever

Localisation, extension longitudinale (noter les PM) et verticale, amplitude de la déformation (difficile à mesurer sans profilométrie).

Tenter de déceler si le désordre est d'origine (aucun autre défaut ou désordre), ou plus récent (forte probabilité de désordres associés).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration longitudinale ouverte dans le méplat, fissures de cisaillement, écaillage en clé, zone sonnante le creux, venues d'eau.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Déformations d'origine (particulièrement dans les profils à fort élancement vertical).

Forte contrainte horizontale, terrain poussant sur le revêtement de façon dissymétrique.

Gonflement du terrain.

Conséquences, évolutions possibles

Accentuation des déformations, chutes ou écaillage de moellons, rupture.

Dangers pour les usagers

Généralement nul (déformation de construction) ; peut devenir fort en l'absence de surveillance (évolution rapide).

Rétrécissement latéral de la section, chocs ou frottements répétés des PL, chute de moellons.

Risques pour les structures

Affaiblissement.

Surveillance

Examen visuel plus fréquent – profilométrie – mesures de déformation (convergences relatives) – mesures de contraintes.

Inspections détaillées plus rapprochées si évolution sensible.

Remèdes

Mise en sécurité par cintres avant renforcement par injection d'extrados pour rétablir la butée entre terrain et revêtement, boulonnage, chemisage en béton projeté.

Observations

À distinguer de « ventre » (fiche 22)

Voir aussi fiche 20 (Aplatissement, pincement).

Informations complémentaires

Le terme « ventre » est utilisé le plus souvent pour désigner les déformations des piédroits en maçonneries vers l'intérieur du profil.

Le ventre est très localisé, contrairement aux autres déformations évoquées (pincement, aplatissement, méplat) qui affectent une grande partie du profil en travers. Il sonne souvent le creux au marteau.



Ventre de piédroit, conforté par ancrages et larges plats



Ventre de piédroit proche de la ruine (maçonnerie très altérée)

Certaines voûtes en maçonnerie montrent des « ventres » systématiques et alignés en naissances ou en piédroits. Il importe alors de bien faire la différence entre une irrégularité de construction (reprise d'œuvre en sommet de piédroit) assez courante, et un désordre apparu depuis.

Si l'y a aucun autre désordre associé au ventre, il est vraisemblablement de construction.

Certains ventres ne sont liées à aucune action du terrain, mais sont dus simplement à l'affaissement d'un revêtement de qualité médiocre sous son propre poids, aggravé parfois par une poussée du blocage non lié. Ce désordre est toujours associé à l'altération des mortiers, point faible des maçonneries.

Il est important de toujours se préoccuper de la nature du terrain encaissant, car son degré d'altération ou son comportement peuvent être la cause principale d'une telle déformation. Le recours aux archives de construction est indispensable, si l'on ne dispose d'aucune reconnaissance plus récente.

Si l'altération de la maçonnerie n'est pas avancée, et si l'ampleur de la déformation reste acceptable pour l'exploitation, un rejointoiement simple permet de freiner l'évolution et stabiliser les moellons descellés.

La remise en état définitive passe souvent par une démolition et une reconstruction selon le profil initial.

Description (aspect visuel du désordre)

Bombement localisé du parement. Plutôt caractéristique des piédroits, il peut parfois apparaître plus haut dans le profil en travers.

Méthodes d'examen

Examen visuel rasant.

Paramètres à relever

Position dans le profil, extension longitudinale, surface (m²), avancée maximum (cm).
Réponse sonore au marteau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Qualité du mortier et des moellons – moellons tombés ou déchaussés – humidité – fissuration.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

- a. De construction : déformation du cintre, reprise d'œuvre.
- b. Ulérieure : affaissement de la maçonnerie par altération des mortiers ; poussée du terrain ou du blocage.

Conséquences, évolutions possibles

Ruine localisée ou chute de moellons progressivement descellés.

Dangers pour les usagers

Aucun, sinon un rétrécissement localisé.

Risques pour les structures

Affaiblissement, puis ruine locale rapide.

Surveillance

Visuelle – mesures simples s'il s'agit d'un ventre en piédroit (mesure de l'avancée par fil à plomb ou règle).

Remèdes

Rejointoiement, voire reconstruction associée éventuellement à des ancrages, si le terrain est en cause.

Observations

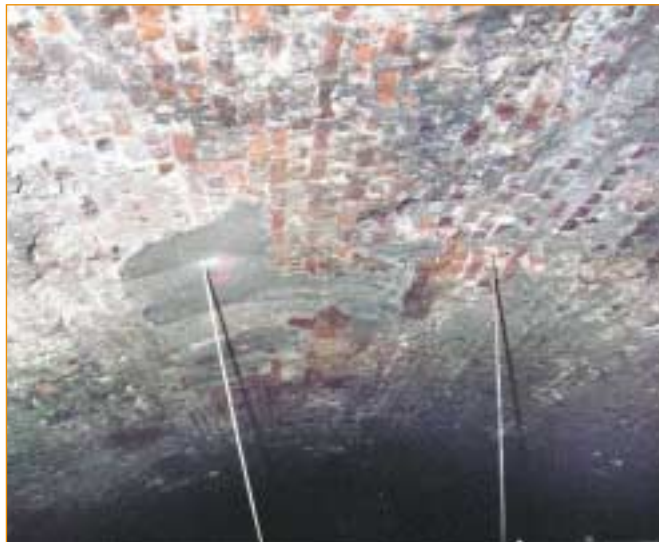
À distinguer de « méplat » (fiche 21).

Informations complémentaires

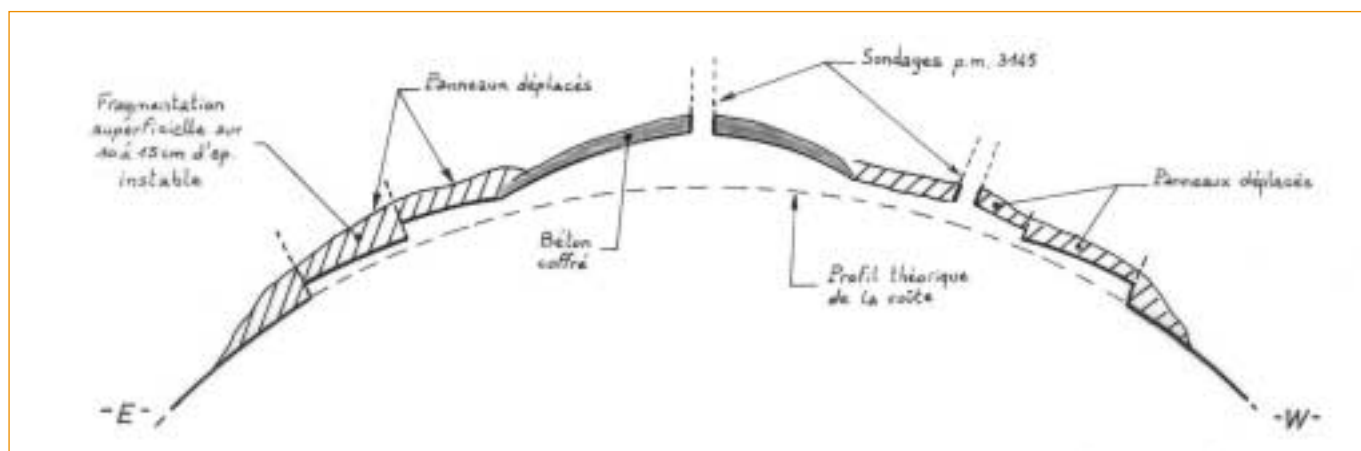
Les parements des moellons ne sont pas alignés, et cela sur plusieurs moellons consécutifs voire plusieurs rangées. Ces moellons peuvent être en retrait ou en avancée par rapport à la surface moyenne de l'intrados.

Les moellons en retrait peuvent provenir d'une mauvaise mise en place. Quand plusieurs rangées de moellons de calotte sont en retrait, et sur une surface importante, c'est le signe d'un « soufflage » de la voûte sous l'effet d'une explosion (fait de guerre ancien, tirs trop violents en radier). La conséquence est une fragilisation de tout le revêtement qui va s'altérer beaucoup plus vite. C'est un désordre spécifique (et rare).

Une avancée de moellons sans autre désordre associé peut être attribuée à une mauvaise mise en place. Le cas est fréquent au niveau des naissances de voûtes, zone de reprise d'œuvre (ou en sous-œuvre) à la construction. Dans le cas contraire, il est probable que des symptômes de ruine ou d'altération poussée soient prépondérants. Le désaffleurement n'est alors qu'une conséquence.



Soufflage: la partie centrale de la calotte a été soulevée par le tir, puis est retombée en place avec des décalages dans les rangs de briques (les tiges matérialisent la position des forages de reconnaissance)



Représentation interprétée des désordres de la zone « soufflée »

Description (aspect visuel du désordre)

Une ou plusieurs assises consécutives de moellons sont décalées par rapport au profil normal d'intrados, soit en retrait, soit en avancée.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Position dans le profil, extension longitudinale et transversale, valeur du décalage (cm), réponse sonore au marteau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Ouverture de joints longitudinaux, fissuration, déjoints, déformation générale du profil, ventre local, qualité des moellons.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

En piédroits et naissances : le plus souvent, défaut de construction à la reprise.

En calotte : mauvaise mise en place des rangées de moellons – désorganisation locale due au souffle d'une explosion (tir de mine en radier, fait de guerre).

Conséquences, évolutions possibles

a. De construction : aucune

b. Accidentel : le revêtement a été fragilisé, voire désorganisé localement, ce qui accélère son altération.

Dangers pour les usagers

Nul à faible

Risque de chutes d'éléments en calotte si la cause est accidentelle.

Risques pour les structures

Nul si d'origine

Affaiblissement si la cause est accidentelle.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Confortation par boulonnage, béton projeté et treillis soudé.

Observations

Informations complémentaires

La fissuration de retrait ne constitue pas un désordre en soi. Elle exprime la diminution de volume accompagnant la prise et le durcissement du béton. Cependant, cette fissuration s'est exprimée différemment suivant les époques ou les types de bétons, et les inspections de voûtes mettent en évidence des désordres qui ont été favorisés par son intensité. Sa description doit être abordée lors des inspections afin de la différencier des fissures d'origine pathologique évoquées dans d'autres fiches.

Bétons modernes : Leur composition est parfaitement maîtrisée, leur mise en place s'effectue sur des coffrages de bonne qualité, la vibration homogénéise bien les coulées successives. Ils ont une bonne compacité et un aspect de surface uni. Les fissures de retrait sont donc faciles à repérer, malgré leur finesse (0,1 à 0,3 mm au début, 1 à 3 mm après plusieurs années).

La figure ci-contre illustre quelques formes classiques de son expression.

- les fissures transversales (1) se développent à partir de la base du piedroit; après quelques années elles peuvent rejoindre les fissures longitudinales;
- les fissures longitudinales (2) expriment assez rapidement le retrait de la masse de béton dans le plan perpendiculaire à l'axe. Elles sont quasi systématiques dans le voisinage de la clé de voûte, lieu géométrique des plus fortes contraintes de traction liées au retrait.

Dans tous les tunnels inspectés à ce jour, les fissures de retrait les plus ouvertes (généralement les grandes fissures longitudinales) se stabilisent aux alentours de 2 à 3 mm d'ouverture, suivant l'importance de la développée de l'intrados. Toute ouverture supérieure sera suspecte et demandera éventuellement une instrumentation de surveillance.

On constate que dans les revêtements récents protégés par une étanchéité extrados totale, les fissures sont moins nombreuses qu'autrefois. Un tel résultat s'explique par des hors profils d'excavation atténués par le béton projeté du soutènement, la présence du complexe étanche limitant le retrait gêné, la meilleure qualité des bétons coulés et de leur mise en œuvre.

La fissuration de retrait ne s'exprime pas forcément sous forme de fissures continues, mais peut prendre l'aspect d'un faïençage lâche et non maillé, particulièrement visible sur un parement riche en laitance.

Bétons plus anciens : Le retrait se manifeste par un maillage fermé plus ou moins dense, quand ce n'est pas une répartition anarchique de longues fissures traversantes. Composition et mise en œuvre du béton, mais aussi épaisseurs irrégulières et adhérence au terrain (absence de feuille étanche) en sont les principaux responsables. **Dans ce cas, le retrait peut être considéré comme une source de désordre**, dans la mesure où il favorise de nombreuses venues d'eau.

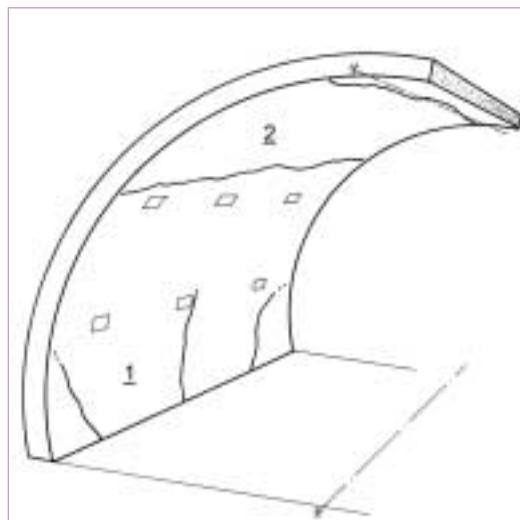
Pour les plus anciens d'entre eux, leur grande porosité et hétérogénéité ont favorisé la dispersion du retrait au niveau des granulats; les fissures y sont beaucoup moins apparentes.

Bétons coffrés armés : Les nappes d'armatures qu'ils contiennent contrarient l'expression du retrait. On note le plus souvent des fissures très fines et parallèles orientées suivant les armatures.

Bétons projetés : Le retrait affecte aussi ces bétons minces, mais ses manifestations sont très variables. Il peut présenter un faïençage de maille pluridécimétrique fermée, généralement visible uniquement par des concrétions blanches de calcite. C'est le cas quand il est projeté directement sur le rocher en place, qui empêche sa libre expression. La présence d'un treillis soudé ne supprime pas totalement la fissuration de retrait.

Les bétons projetés seulement armés de fibres semblent, pour l'instant, moins fissurés.

Quand le béton est projeté sur une étanchéité totale, à la surface plus régulière, la fissuration de retrait ne disparaît pas forcément; son expression est donc aussi fonction de sa composition et des conditions de sa mise en œuvre.



Expressions habituelles du retrait au sein d'un anneau (béton moderne avec étanchéité)



Expressions du retrait au sein d'un béton de 1970 sans étanchéité extrados

Description (aspect visuel du désordre)

Fissures fines dont la longueur augmente avec le temps (visibles à partir de 0,1 mm). Elles ne montrent aucun désaffleurement des lèvres.

Béton coffré : ouvertures rarement supérieures à 3 mm.

Béton projeté : le retrait normal (< 1mm) est très difficile à distinguer sur du BP.

Méthodes d'examen

Examen visuel rapproché sous éclairage puissant.

Paramètres à relever

Tracé – densité – maillage ouvert ou fermé – ouvertures (en mm) – importance des venues d'eau par fissures (tunnels sans étanchéité extradados).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Mauvaise qualité du béton – humidité – zones sonnant le creux.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Le retrait est l'expression du vieillissement normal du béton .

Sa densité est liée aux nombreux paramètres de fabrication, de mise en place et de cure.

Conséquences, évolutions possibles

Altération du béton par les venues d'eau (tunnels sans étanchéité extradados).

En cas de déformation du profil, certaines fissures peuvent s'ouvrir pour des raisons structurelles. Elles sont alors qualifiées de fissures pathologiques et non plus de fissures de retrait.

Dangers pour les usagers

Nul.

Risques pour les structures

Nul.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Le retrait en soi ne nécessite aucune réparation.

Les fissures aquifères les plus gênantes pour l'exploitation peuvent être injectées.

Observations

* Le terme est pris au sens de «retrait total».

Voir aussi fiches 8, 9, 10.

Informations complémentaires

Ce désordre est assez fréquent dans les tunnels modernes, où les cadences des cycles de bétonnage sont serrées.

Ce type de rupture apparaît le plus souvent au niveau d'un rein entre 3 et 6 m de hauteur, plus rarement sur l'axe de clé. Il apparaît à l'aval de l'anneau précédemment coulé sur lequel vient s'appuyer le coffrage. Cette zone d'appui est justement celle où le béton pompé peut être mal serré au support ; il y a donc un jeu, même minime, qui autorise une cassure par rotation. La présence du complexe d'étanchéité (DEG) est parfois suffisante pour expliquer ce « jeu ». La position de ces lunules dans les anneaux reflète le sens de bétonnage du revêtement.

Sur un cas connu, la rupture est apparue lors d'un réglage du coffrage qui se déformait pendant la montée du béton (fuites de laitance). L'action des vérins de pied a été suffisante pour provoquer la rupture.

Plusieurs lunules imbriquées ont pu être parfois observées, sans qu'il y ait jamais d'instabilité associée.

Ces zones, le plus souvent réparées par injection de résine (rarement par épingles), sont néanmoins à ausculter avec attention à chaque inspection détaillée.



Lunules imbriquées en rein (la base de la photo correspond au trottoir). Le bétonnage s'est fait de la droite vers la gauche

Description (aspect visuel du désordre)

Fissure régulière et courbe, généralement située en rein à l'extrémité d'un anneau, ayant son origine et son extrémité sur le même joint transversal de bétonnage.

Méthodes d'examen

Examen visuel, **auscultation au marteau**.

Paramètres à relever

Ouverture et désaffleurement (mm), dimensions du panneau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Zone sonnante le creux, signe que le panneau est relativement mince et qu'il comporte un vide à son extrados (mauvais clavage).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Fissure de rupture provoquée par l'appui du coffrage sur l'anneau précédemment coulé qui n'a pas encore atteint sa résistance maximale. Le coffrage qui se déforme pendant le bétonnage crée un excès de contrainte ponctuel sur l'anneau déjà coulé.

Conséquences, évolutions possibles

Déstabilisation du panneau.

Dangers pour les usagers

Aucun jusqu'à présent, pour les cas connus.

Risques pour les structures

Aucun jusqu'à présent, pour les cas connus.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Injection de la (des) fissure(s).

Observations

Ce type de désordre est généralement réparé directement sur le chantier par des injections.

Informations complémentaires

Les joints entre anneaux de béton coffré revêtent plusieurs aspects :

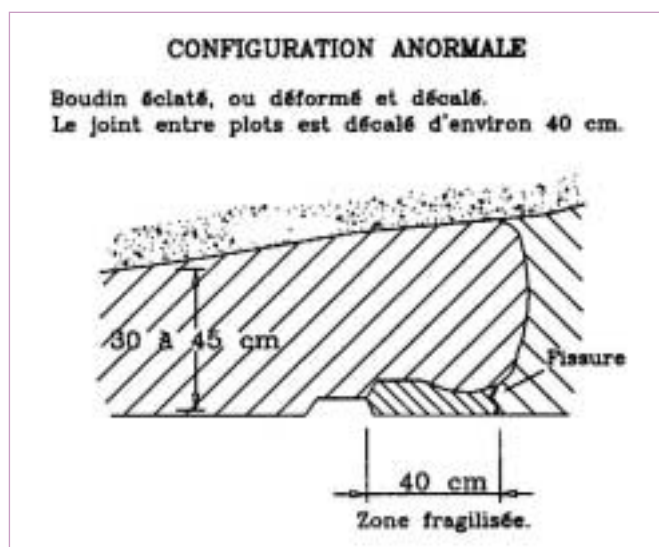
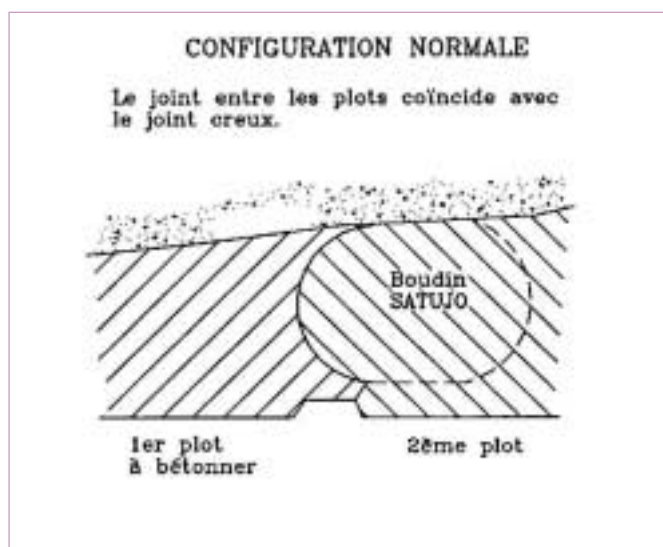
- **joints secs sans traitement particulier** : c'est le cas des bétons anciens ; les défauts d'alignement des anneaux contigus sont bien visibles ;
- **joints secs ragrésés** ;
- **joints en creux** : un profilé souple collé sur le coffrage matérialise une saignée entre les deux anneaux.

Les principaux désordres relevés sur ces joints sont :

- déplacement de la fissure de joint dans l'un des anneaux ; l'une des lèvres présente alors un décollement de plaque ;
- présence assez fréquente de ségrégations locales de granulats au niveau des lèvres ; elles provoquent en béton ancien soit des venues d'eau, soit des instabilités localisées ;
- décollements et chutes des ragréages mis en place sur ces joints à des fins esthétiques, ou aérauliques en gaines de ventilation ;
- des essais de masques de coffrage ont été réalisés à l'aide de boudins gonflables (type Satujo) ; le déplacement ou la perforation de ces boudins ont provoqué des désordres spécifiques illustrés ci dessous. Certaines plaques sont tombées d'elles-mêmes.



Le béton du plot de droite s'est moulé sur le boudin SATUJO dégonflé - la zone fragile est tombée



Description (aspect visuel du désordre)

Désordre affectant les lèvres d'un joint séparant deux anneaux de béton coffré contigus : épaufrure, écaille, fissure, altération. Désordre affectant l'aménagement ou le remplissage du joint.

Méthodes d'examen

Examen visuel, auscultation marteau.

Paramètres à relever

Extension du phénomène sur le joint – toute mesure adaptée à la quantification du désordre observé. Les ragréages posés à cheval sur le joint pour diverses raisons se décollent toujours au fil du temps. Les sonder systématiquement au marteau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Mauvaise compacité du béton des lèvres du joint – humidité.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Malfaçons – mouvements relatifs entre anneaux.

Conséquences, évolutions possibles

Extension – aggravation.

Dangers pour les usagers

Risques de chutes de ragréages ou d'éléments de béton.

Risques pour les structures

Aucun, si aucun autre désordre n'affecte les deux anneaux contigus.

Surveillance

Examen visuel – IDP exceptionnelle.

Remèdes

Purges de sécurité (éventuellement grillage de sécurité temporaire) – la reconstitution des lèvres d'un joint dégradé est toujours possible, mais il faut laisser au joint sa liberté de mouvement.

Observations

Informations complémentaires

Ce défaut courant dans les bétons anciens provient à la fois de la composition du béton et de sa mise en place (petites gachées, pilonnage au lieu de vibration, composition variable au cours d'un même chantier).

Il peut avoir plusieurs origines :

- tri des granulats lors de la coulée qui « ruisselle » sur le coffrage ;
- attente trop longue entre deux gachées, empêchant le bon mélange des couches de béton ;
- vibration mal conduite (aussi bien par les aiguilles que par les vibreurs de coffrage).

Ce défaut se rencontre aussi dans les bétons modernes, mais il est peu étendu et limité à certaines reprises de gachées ou en bordure des joints d'anneaux. Il ne constitue que très rarement un désordre.

Dans les revêtements non étanchés, ces zones de plus grande perméabilité peuvent avoir pour conséquence des suintements, des concrétions, une altération plus rapide du béton par dissolution du liant.

Les nids de cailloux étaient courants dans les bétons anciens dans lesquels les gachées étaient nombreuses et de plus faible volume, la vibration médiocre. Passage préférentiel des venues d'eau, ces zones peuvent s'altérer rapidement jusqu'à devenir parfois presque meubles et instables, affaiblissant localement le revêtement. En l'absence d'agents agressifs, leur tenue dans le temps peut être excellente.

Si le désordre est très étendu (plusieurs m² en béton ancien), la structure peut être localement fragilisée.



Béton de 1936. Chaque montée de béton est soulignée par un alignement de nids de cailloux, perméable et parfaitement horizontal dû à la mise en place



Nid de cailloux initialement masqué par une pellicule de laitance. Son étendue ne peut être cartographiée qu'à l'auscultation au marteau

Description (aspect visuel du désordre)

Zones de granulats sans fines, apparentes ou cachées par une mince pellicule de laitance.
C'est un défaut volumique et pas seulement de surface.

Méthodes d'examen

Examen visuel – auscultation marteau.

Paramètres à relever

Superficie – préciser si le défaut est local, lié à une reprise de bétonnage, situé aux abords des lèvres d'un joint, ou présente une extension aléatoire, voire générale.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Granulats bien liés ou instables – zones sonnant creux autour du défaut.
Humidité.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Défaut local lié à la mise en place du béton (influence de la vibration), plus rarement à sa mauvaise courbe granulométrique. Il y a une ségrégation locale du matériau.

Nota: certains bétons anciens ont un aspect «nid de cailloux» généralisé, bien que les granulats soient très bien liés.
Les circulation d'eau (altération d'origine chimique, érosion), le gel, sont des facteurs aggravants.

Conséquences, évolutions possibles

Approfondissement de la poche par altération et chute progressive des granulats. Le défaut devient un désordre.

Dangers pour les usagers

Chutes de granulats.

Risques pour les structures

Affaiblissement local de la voûte (tunnels anciens).

Surveillance

Noter un approfondissement éventuel.

Remèdes

Réparation localisée s'il s'agit d'une poche altérée au sein d'un béton compact: mise en place de béton projeté + treillis soudé épinglé.

Observations

Informations complémentaires

La solution interstitielle du béton ayant un pH proche de 13 est chimiquement instable vis-à-vis de toute agression extérieure qui est forcément plus acide.

Celle-ci agira obligatoirement sous la forme d'une solution formée par dissolution d'un gaz par l'humidité de l'air ou celle des pores du matériau, ou provenant du lessivage du terrain encaissant (tout particulièrement les sols).

L'action chimique acide débute toujours par une dissolution suivie d'une cristallisation de composés néo-formés qui peuvent être liants, non liants, voire expansifs.

Les agents agressifs diffusent d'autant mieux à l'intérieur d'un matériau que celui-ci est poreux (et perméable) et que son taux d'humidité est renouvelé et de l'ordre de 60% (ni sec, ni saturé).

Leur effet délétère dépend de la permanence de leur alimentation, mais comme ces agents sont en quantité inépuisable par rapport aux constituants réactifs du matériau, l'évolution de celui-ci est finalement réglée par le temps. Il peut y avoir une stabilisation temporaire, mais assez souvent, dans les bétons anciens, une mauvaise qualité d'origine conduit à une altération complète.

En tunnels, les principaux agresseurs sont le dioxyde de carbone de l'atmosphère (CO_2), les eaux douces ou peu minéralisées, les eaux sulfatées (séléniteuses), le dioxyde de soufre (SO_2) dégagé par les gaz d'échappement, accessoirement les chlorures. L'action bactérienne, bien que partout présente, n'est pas identifiée comme un agresseur fort en tunnel routier.

Les réactions nombreuses et complexes qui s'opèrent au sein d'un béton ou d'un mortier ne seront que résumées ci-après de façon très succincte ([Bibliographie](#)).



Béton altéré par dissolution et lessivage et soumis au gel

Action du CO_2 : dissolution et précipitation

L'eau chargée en gaz carbonique (acide carbonique H_2CO_3) dissout en priorité la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) du liant pour former un bicarbonate très soluble qui sera entraîné. Cette perte de masse augmente la perméabilité du béton. Parallèlement, ce bicarbonate va réagir avec la portlandite pour donner de la calcite, carbonate liant très stable, et de l'eau. Ce phénomène est appelé carbonatation. Il contribue à diminuer la perméabilité. Mais le cycle de dissolution continue d'agir sur la portlandite et la calcite néoformée du fait d'un apport constant de CO_2 .

Suivant la porosité et la perméabilité originelle du béton, l'une ou l'autre de ces deux actions antagonistes va dominer. Généralement, la formation de carbonates stables dans le réseau des pores diminue progressivement la perméabilité, freinant ainsi la diffusion des acides. La réserve alcaline du cœur du béton peut alors jouer un rôle de barrière.

Parallèlement, à proximité de la surface libre, une partie du bicarbonate de chaux très soluble va migrer en surface (pression osmotique) à la faveur de défauts locaux du béton (ségrégations, fissures). Au contact du CO_2 de l'air et par évaporation, il y aura un dépôt de calcite plus ou moins important sur le parement.

On conçoit donc qu'un béton peu perméable et contenant peu de chaux résistera mieux à l'attaque acide et conservera plus longtemps ses caractéristiques mécaniques.

Action des sulfates : expansion

Exogènes :

- les eaux ont circulé à travers des terrains sulfatés ou magnésiens (gypse, anhydrite, fronts de dédolomitisation, mais aussi sols en évolution) et acquis une forte concentration en sels solubles ;
- la décomposition de silicates ferromagnésiens, mais aussi la présence fréquente de sulfures (pyrites) dans les roches conduit par oxydation à la formation de sulfates, qui seront remobilisés. On peut être alerté de ces processus par l'apparition sur les revêtements de taches ou coulures jaunes à brunes d'hydroxyde de fer (goethite), associées à la formation d'acide sulfurique (à ne pas confondre avec de la « rouille » d'armatures) ;
- une atmosphère de tunnel routier chargée en anhydride sulfureux (SO_2) peut déclencher la formation de sulfates, mais dont l'action reste très superficielle et non délétère.

Endogènes :

- certains granulats (anciens) pouvaient contenir beaucoup de pyrite ;
- des sulfates se forment au sein du matériau au cours de l'enchaînement des réactions chimiques (néo-formations stables ou instables).

Mode d'action des sulfates

La chaux du liant est dissoute, donnant lieu à la formation de sulfate de calcium, immédiatement remis en solution (il y a alors entraînement de matière) et de gypse (secondaire) expansif. Celui-ci réagit alors avec l'aluminate tricalcique du ciment pour former de l'**ettringite secondaire (Sel de Candlot)**, ou de la **thaumasite**. Ces composés **fortement expansifs et non liants** sont les principaux responsables de la **désagrégation** des mortiers, voire de certains bétons anciens, par destruction progressive des liaisons inter granulaires.

Suivant le contexte, d'autres cations (Mg, K, Na) participent à ces réactions complexes.

S'il sont invisibles à l'œil nu, ces sels particuliers disposent souvent d'un marqueur caractéristique apparaissant sur la surface libre sous forme d'efflorescences fibreuses blanches et instables.

Description (aspect visuel du désordre)

Stade précoce : dépôts d'exsudats calcaires résultat d'une dissolution interne, ou efflorescences.

Stade ultime : des poches de consistance plus ou moins meubles soulignent des reprises de gachées, ou apparaissent en position aléatoire au sein de l'anneau – elles sont parfois présentes sous une pellicule de laitance encore intacte qui sonne le creux.

Méthodes d'examen

Examen visuel – auscultation marteau.

Paramètres à relever

Altérations visibles – position dans le profil (systématique ou aléatoire) – surface et profondeur des poches altérées – consistance et teinte – stabilité.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau continues – forte fissuration – signes d'attaques sulfatiques (efflorescences).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Bétonnage par temps de gel – sous-dosage en ciment – dissolution du liant (action du CO_2 , des sulfates, des chlorures) – formation de composés non liants, voire expansifs.

Conséquences, évolutions possibles

Augmentation progressive de la porosité, pénétration accrue des agents agressifs, perte de cohésion.

Amincissement du revêtement par érosion régressive.

Dangers pour les usagers

Chute d'éléments (granulats, plaques).

Risques pour les structures

Ruines locales.

Surveillance

Examen visuel.

Analyses d'eau et de béton.

Remèdes

Drainage.

Reconstitution.

Observations

Voir aussi fiches 2 (Efflorescences), 18 (Altération des mortiers).

Informations complémentaires

Dans les voûtes en béton (coffré ou projeté), l'écaillage mécanique peut se manifester en tout point du profil par des fissures de cisaillement avec décollement d'écaïlles. Le revêtement se rompt rapidement sous l'action de contraintes excessives à l'intrados. Ces avaries sont localisées selon une ou plusieurs génératrices du tunnel, et souvent en clé de voûte.

Lorsque le cisaillement intrados s'est produit, le phénomène est bien visible si on s'approche suffisamment de la voûte, et en l'éclairant d'une lumière rasante.

Si l'écaillage n'est pas encore révélé, le choc du marteau permet cependant, par une réponse vibratoire caractéristique, de suspecter le phénomène. Ainsi, un intrados ne montrant qu'une fissuration discrète mais sonnante le creux à une hauteur bien déterminée du profil en travers, peut être suspecté de mise en contrainte. Une démolition locale au marteau permet parfois de mettre en évidence la fissure de cisaillement.

Nota : L'excès de compression au sein d'un revêtement peut produire aussi des fissures parallèles à l'intrados, non inclinées, et plus difficiles à appréhender sinon par le martelage.

Il est souhaitable de compléter un diagnostic d'écaillage par des mesures de convergences dans la zone atteinte, afin de quantifier une déformation évolutive. Des mesures au vérin plat en plusieurs points du profil en travers permettent de connaître les valeurs des contraintes de compression dans le revêtement, données précieuses dans le cadre d'un projet de réfection.

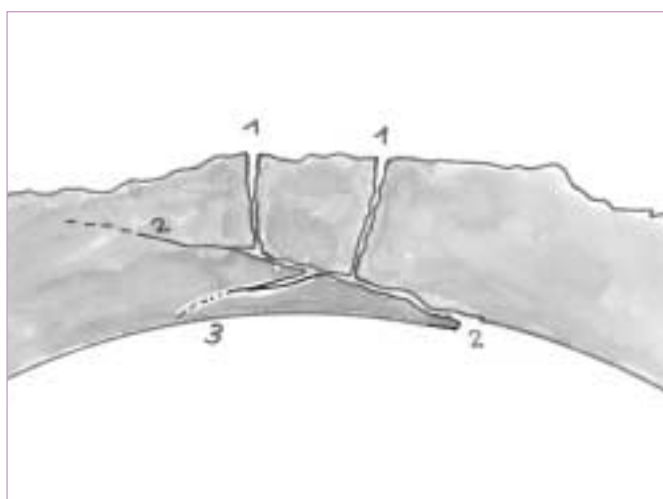


Schéma du mécanisme d'écaillage du béton
(exemple en clé de voûte)

L'intrados est mis en compression et les fissures suivantes se forment :
Type 1. Fissures de traction à l'extrados ;
Type 2. Fissure de cisaillement à l'intrados : la fissure est ouverte car le matériel broyé foisonne et tend à repousser l'écaïlle en formation ;
Type 3. La racine de l'écaïlle cède rapidement et celle-ci devient instable. Toute la sous-face va sonner le creux.



Début de cisaillement du béton en clé.
La fissure cisailante (type 2) est ici nettement exprimée ;
la lèvre est fragile

Description (aspect visuel du désordre)

C'est une rupture qui se manifeste par une ou plusieurs fissures de cisaillement délimitant des écailles de toute taille.
C'est un désordre structurel.

Méthodes d'examen

Auscultation marteau – examen en lumière rasante.

Paramètres à relever

Dimensions des écailles (surface et épaisseur présumées) – position particulière dans le profil en travers – ouverture et désaffleurement de la (des) fissure(s).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration de voûte anormale (réseaux orientés, décalage de lèvres,...), profil déformé.
Zones proches d'aspect sain, mais sonnantes creux au marteau.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Excès de compression dans le revêtement, dépassant la résistance mécanique du béton.

Conséquences, évolutions possibles

Extension du risque, car le désordre est à la fois extensif et intensif.
Même s'il n'est pas associé à une déformation de la voûte (cas fréquent), le phénomène est critique.

Dangers pour les usagers

Chutes de plaques de béton fragilisées.

Risques pour les structures

Il s'agit d'une rupture plus ou moins complète du revêtement.

Surveillance

Visuelle (écailles tombées) – noter les PM des chutes.
IDP rapprochées – mesures des déformations du profil (convergences relatives) – mesures des contraintes dans le revêtement.
Mise sous surveillance renforcée ou haute surveillance suivant les résultats des mesures.

Remèdes

Sécurité des usagers : purges fréquentes – pose de grillages de retenue.
Suivant le résultat de la surveillance et des mesures, une réfection par renforcement de la structure, voire reconstruction est parfois inévitable.

Observations

Ne pas confondre avec « éclatement sur armature » (fiche 30).

Informations complémentaires

Ce désordre est rarement rencontré dans les tunnels récents dont les sections armées sont réduites (têtes, profils renforcés). Il se résume le plus souvent à un éclatement de la laitance au droit d'un fer trop proche de l'intrados (moins de 1 cm). Il est déclenché par le processus de **carbonatation du béton** (☛ Fiche 28) qui s'opère à partir de l'intrados.

La zone carbonatée ayant un pH de l'ordre de 9, la couche de passivation des armatures métalliques les plus proches de l'intrados est détruite; l'acier va alors se corroder et déclencher des éclatements du béton par foisonnement du métal oxydé.

En revanche, quelques tunnels (années 50 à 70) ont pu être réalisés entièrement en béton armé; compte tenu des normes de l'époque, et de l'absence d'étanchéité, le désordre apparaît dans les zones humides, poreuses où la carbonatation a pénétré profondément.

La corrosion des armatures est donc plus ancienne et plus développée. La percolation des eaux du terrain accélère la corrosion. Le foisonnement du métal oxydé peut alors décoller des écailles de béton de 1 à 3 cm d'épaisseur, créant ainsi un risque pour l'utilisateur, plutôt que pour la structure (ce désordre est rarement généralisé à l'ensemble du tunnel). Une fissuration préexistante ne semble jamais être à l'origine du désordre.

La disparition de l'enrobage de béton superficiel met à nu les armatures, et celles-ci apparaissent rouillées. L'auscultation au marteau permet de déceler le désordre avant qu'il ne soit déclaré, ou son extension prévisible (le béton sonne creux autour de l'écaille sur le tracé de l'armature).

Le phénomène étant évolutif, il faut donc agir rapidement avant la chute d'éléments volumineux.

Les bétons projetés montrent parfois des éclatements en zone humide au droit des plaques d'appuis des boulons.

Ce désordre affecte aussi les éléments préfabriqués minces (☛ Fiche 31), dans lesquels il peut être plus rapide et étendu que dans un béton épais. En effet, une faible épaisseur de recouvrement des fers ainsi qu'une fissuration de retrait traversante peuvent diminuer rapidement leur résistance.

Spectre des armatures

La photo ci-contre illustre l'aspect d'un spectre des armatures à l'intrados d'un anneau armé seulement en piédroits. Des perçages de contrôle ont pu confirmer que ce spectre est d'autant plus marqué que les fers sont proches de l'intrados et qu'il disparaît quand les fers sont à plus de 5 cm de profondeur. De fines fissures de retrait peuvent souligner les lignes du spectre. Un fer tangent provoque à court terme un éclatement de laitance très localisé.

Les causes sont multiples: mise en résonance de la nappe d'armature pendant la vibration interne ou externe – légères ségrégations entre fer et coffrage par effets de paroi (proximité du coffrage et des armatures) – pellicule de graisse sur les armatures (rare, mais constaté).

Le spectre se rencontre très souvent dans les tunnels récents mais n'entraîne pas obligatoirement d'éclatement superficiel.



Une armature de fort diamètre peut décoller une écaille de 2 à 3 cm d'épaisseur (béton de 1963)



Éclatements dans un béton récent



Spectre des armatures en piédroit

Description (aspect visuel du désordre)

Fers oxydés apparents (chute du béton d'enrobage ou de la laitance).
Écaille tombée, ou décollée mais toujours en place.

Méthodes d'examen

Examen visuel – auscultation au marteau (particulièrement si le spectre des armatures est très affirmé).

Paramètres à relever

Extension des zones d'armatures visibles (ou de leur spectre), dimensions des écailles, épaisseur.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Humidité – altérations du béton – fissures fines, parallèles et nombreuses – présence de zones sonnantes creux.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Dépassivation des fers par la carbonatation du béton.

Propagation de l'humidité jusqu'aux armatures qui rouillent et gonflent, faisant éclater le béton (enrobage trop faible) – mauvais positionnement des fers ou déplacement pendant la montée du béton.

L'absence d'étanchéité extrados, une atmosphère chargée de gaz d'échappement, la présence de chlorures aux têtes (sels de déverglaçage) sont des facteurs aggravants.

Conséquences, évolutions possibles

Extension progressive de l'oxydation le long de l'armature, et donc des décollements.

Dangers pour les usagers

Chutes de plaques ou d'éléments si le désordre est situé au dessus des voies de circulation (surtout bétons armés anciens).

Risques pour les structures

En béton coffré de voûte, la profondeur du désordre est limitée à l'épaisseur du recouvrement des fers.

Dans le cas d'éléments minces, la résistance peut être diminuée.

Surveillance

Examens visuels fréquents.

Remèdes

Purges, piquages, dégagement complet et passivation des fers, ragréages.

Observations

Voir aussi fiche 31 (Éléments préfabriqués).

Informations complémentaires

Cette fiche s'applique principalement aux éléments voûtés minces en béton armé remplaçant un revêtement classique construit en place.

Il existe des structures relativement anciennes (années 1950) réalisées en béton armé, constituées d'un voile voûté mince (5 à 6 cm) renforcé de nervures. Ces éléments, préfabriqués à l'extérieur, ont été transportés en tunnel et posés jointifs sur des corbeaux en béton ; leur longueur est de 1 m environ. Ils ne sont pas liaisonnés entre eux.

Aucun soutènement d'excavation ni remplissage n'étaient mis en place à l'extrados. Il est donc possible d'inspecter un espace annulaire parfois important.

Quand ces éléments sont complétés dès la construction par un béton de remplissage auquel il servent de coffrage perdu, leur fragilité disparaît donc.



L'élément central est percé par un choc (traces de frottements). La fissuration est importante. L'extrados des éléments n'est pas bloqué au terrain (vide visible)



Élément avec son armature de manutention

Description (aspect visuel du désordre)

Fissures, épaufrures avec fers apparents, éclatements par corrosion des fers.
Chocs de PL sur les éléments mal alignés, entraînant des épaufrures profondes et des déplacements d'éléments.

Méthodes d'examen

Examen visuel – auscultation marteau.

Paramètres à relever

Dimensions ou extension du désordre par rapport à la taille de l'élément préfabriqué.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Les éléments atteints sont-ils groupés ou isolés?
Si l'espace annulaire extradados est accessible, rechercher une éventuelle surcharge rocheuse.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Chocs à l'intrados – surcharges à l'extrados.

Conséquences, évolutions possibles

Rupture de l'élément, voire chute.

Dangers pour les usagers

Chutes de débris ou d'un élément entier suite à un choc.

Risques pour les structures

Destruction des éléments.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Remplacement (si possible).

Observations

La fiche ne concerne pas les voussoirs mis en place après le passage d'un tunnelier.

Informations complémentaires

Le béton projeté est systématiquement utilisé dans les méthodes de soutènement des excavations, avant la pose de l'étanchéité et du revêtement. Cette fiche ne concerne que les bétons projetés apparents constituant le revêtement définitif d'un tunnel (neuf ou réparé).

La fiche s'applique à tous les mortiers ou bétons mis en place par projection.

Chronologiquement, on trouve :

- **les gunites** : mortier projeté sous forme de couche mince (1 à 3 cm) en moyenne, rarement armé, dont le but était de stabiliser la surface instable d'une excavation. Très rapidement altérées ou décollées, les gunites n'assurent plus aucune protection contre les chutes de pierres ;
- **les bétons projetés** : utilisés en tunnels anciens dans le cadre de confortements, ils sont plus épais (5 à 15 cm) ; le plus souvent armés de treillis soudé épinglé au rocher. Leur tenue dans le temps est généralement très bonne ;
- **les bétons projetés fibrés** (fibres plastiques ou métalliques), avec ou sans treillis soudé. La fissuration est moins développée ;
- **les coques auto-stables** réalisées en béton projeté armé avec étanchéité totale. Aucun désordre spécifique lié à la technique de fabrication n'apparaît pour l'instant.

L'auscultation des bétons projetés directement sur la roche fait toujours apparaître de nombreuses zones sonnant le creux au marteau. Ce type de revêtement mince étant souvent mis en place sur un terrain de cohésion variable, ce n'est pas le béton qui sonne le creux mais l'ensemble béton + roche adhérente localement décollée.

Il convient donc de rechercher si une fissuration anormale ne vient pas délimiter des panneaux pouvant devenir instables. La situation la plus critique est celle de terrains gonflants que le revêtement ne pourra pas contenir ; il y aura donc rupture ([Fiche 12](#)).

Si un dispositif d'étanchéité ou de drainage a été mis en place avant la projection, la coque de béton sonnera le creux dans sa totalité, sans que cela ne constitue un désordre ([Fiche 45](#)).



Le treillis soudé n'a pas reçu un recouvrement suffisant (malfaçon)



Faïençage d'un béton projeté sur rocher humide



Béton projeté tombé en calotte. Conjugaison d'une projection mal conduite, sur un terrain schisteux, humide et instable, soumis au gel prolongé

Description (aspect visuel du désordre)

Fissuration particulière de type faïençage.
Défauts d'enrobage du treillis soudé, parfois localement apparent (aspect « gaufré »).
Fortes variations d'épaisseur, surtout sur le rocher (présence de « pointes »)
Éclatements superficiels sur treillis ou tête de boulon oxydés.
Défaut d'adhérence au support ou support rocheux altéré (zones sonnant le creux).
Ruptures et chutes partielles.

Méthodes d'examen

Examen visuel – auscultation marteau.

Paramètres à relever

Zones sonnant le creux (extension et position dans le profil) – adhérence du béton aux limites (cas de « rustines » de réparation) – présence d'instabilités localisées aux limites – estimer l'épaisseur d'enrobage du treillis soudé.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau ponctuelles – fissures de grande extension, ouvertes.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Projection sur un support mal nettoyé ou purgé – présence de venues d'eau.
Défauts de mise en œuvre – mauvaise qualité du support – zones sans treillis soudé ni fibres (réparations anciennes).
Un béton projeté résiste mal à un gonflement du terrain.

Conséquences, évolutions possibles

Instabilités locales, altérations.

Dangers pour les usagers

Chutes d'éléments (rares).

Risques pour les structures

Faibles à forts suivant l'intensité des désordres.

Surveillance

Examen visuel – noter l'apparition de fissures.

Remèdes

Mise en sécurité par purges des parties instables – reconstitution de la continuité du revêtement.

Observations

Voir aussi fiche 45 (Complexes isolants étanches).

Informations complémentaires

La plupart d'entre eux sont la conséquence des procédures de mise en oeuvre. Ils ne sont pas considérés comme des désordres en tunnels. On citera pour mémoire :

Bullage (ou soufflure), fuites de laitance ou nids de cailloux, ressuage, pommelages, variations de teinte, traces de rouille, spectre des armatures (► [Fiche 30](#)), déformations localisées du coffrage.

Nous renvoyons au Guide Technique édité par le LCPC dont les descriptions s'appliquent à tous les types de parements d'ouvrages d'art courants.

Les photos suivantes illustrent quelques aspects de ces défauts sur les parements de tunnels.



Déformation locale du coffrage



Faïençage dense



Ressuage



Fentes



Bullage (ou soufflures)



Traces d'écoulement depuis pipe de clé

Description (aspect visuel du désordre)

Défauts altérant l'aspect, la teinte ou l'uni de surface de l'intrados.

Méthodes d'examen

Examen visuel – vérification au marteau.

Paramètres à relever

Étendue, intensité.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Altération locale – autres désordres (ségrégations, humidité, zone sonnante le creux, fissures).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Composition du béton, qualité de la peau du coffrage, influence du produit de décoffrage, mise en place et vibration du béton, qualité de la cure.

Conséquences, évolutions possibles

Aucune sauf si désordres associés évolutifs.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Aucun sauf si désordres associés évolutifs.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Aucun sauf si désordres associés évolutifs.

Observations

On observe que ces défauts sont localisés le plus souvent en piedroits ou en naissance.

Informations complémentaires

Radiers

Les radiers qui ont été mis en place dans certains tunnels anciens sont soit contrevoûtés, soit plans et correspondent à des zones de géologie difficile nécessitant un revêtement renforcé.

Si une déformation de la structure par une évolution du terrain encaissant provoque leur rupture (soulèvement, pincement des piédroits par gonflement du terrain, tunnel recoupé par un plan de glissement de versant), les désordres se manifestent par une fissuration et un soulèvement de la chaussée.

Ce type de désordre est très rare sur le réseau routier national, mais affecte quelques tunnels sur réseaux secondaires.

On ne connaît pour l'instant aucun désordre structurel pouvant provenir du comportement anormal d'un radier.

Description (aspect visuel du désordre)

Le radier étant invisible, on ne détecte que les désordres se manifestant au niveau de la chaussée ou des piédroits.

Méthodes d'examen

Examen direct impossible.

Paramètres à relever

Tous désordres anormaux en chaussée (remontées d'eau, déformation ou fissuration), en voûte (densité et forme de fissuration différentes).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration anormale de certains plots de voûte (densité, tracé, ouvertures).
Remontées d'eau en chaussée.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Terrains gonflants (rechercher les archives de creusement – coupes ou synthèses géologiques).
Charge d'eau importante.

Conséquences, évolutions possibles

Dégradation de la chaussée – déformation d'anneaux de voûte.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Faible à fort suivant le contexte.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

À adapter après étude spécifique.

Observations

Informations complémentaires

Les chaussées des tunnels actuels peuvent être considérées comme étant surdimensionnées par rapport à une chaussée extérieure, puisqu'elles sont mises en place sur un « radier de chantier » en béton, ce qui augmente leur rigidité.

Dans nombre de tunnels anciens encore en service, épaisseurs moindres et drainage mal assuré conduisent à des désordres rapides, mais dont aucun n'est spécifique au milieu « tunnel ».

Certaines chaussées anciennes (en voie de disparition) sont constituées de dalles de béton, coulées en place sur une sous-couche drainante, ou sur un matériau isolant. Les contraintes de la circulation ont conduit rapidement à la rupture de ces dalles, sous l'action des vibrations ; les phénomènes de « pompage » ont rapidement dégradé les sous-couches.

L'engorgement de certains drains profonds, destinés à assainir les fouilles de la plateforme, induit des remontées d'eau à travers la couche de roulement. Des soulèvements temporaires de celle-ci ont pu être constatés.

Les venues d'eau, sous forme de gouttes continues tombant sur le revêtement de la chaussée, arrivent avec le temps à colmater l'enrobé ; il se forme une plaque mince de calcite plus ou moins étendue et totalement lisse. Le grenailage de ces zones n'a qu'une action temporaire.

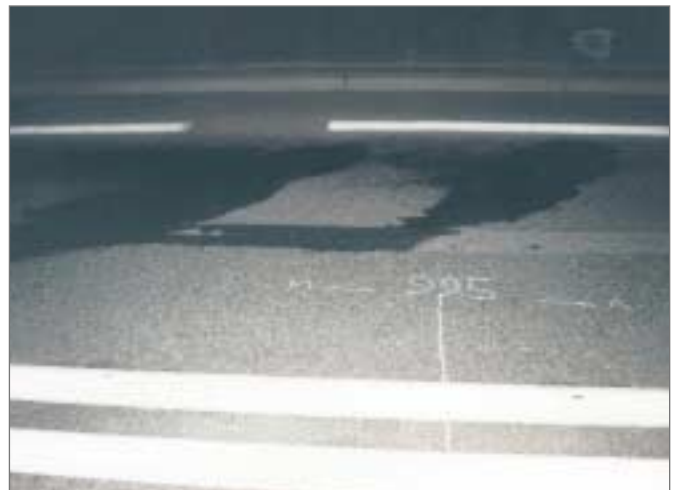
Dans les tunnels de section circulaire, les chaussées peuvent être constituées par des dalles en béton armé réalisées en place ou préfabriquées. Ces structures élaborées permettent de créer un espace inférieur dédié à la ventilation. Leur mode de fonctionnement génère des désordres particuliers.

Dalle de chaussée sur appuis latéraux (type Fourvière) : la dalle post-contrainte sur une grande longueur repose librement sur des appuis latéraux et un appui central permettant les déplacements dus aux variations thermiques. On a constaté (avant réfection complète) une forte dégradation de certains appuis (oxydation, éjection des joints sous l'effet du battement). La cloison centrale était localement fragilisée.

Dalle de chaussée préfabriquée avec poteaux et voile (type Caluire) : on ne connaît pour l'instant aucun désordre spécifique.



Faïençage, pompage et flaches
Fondation saturée d'eau et comportant des vides
de dissolution



Remontée d'eau au travers de l'enrobé

Description (aspect visuel du désordre)

Faïençage et flaches avec remontées d'eau – fissures longitudinales ou transversales.
Bombements, affaissements localisés.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

PM de la zone – voie – surface affectée – remontées d'eau visibles – déformations de la couche de roulement.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Indices d'engorgement de drains ou de collecteurs.
Indices de déformation dans le revêtement de voûte – fissuration anormale.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Le plus souvent, concrétionnement des drains de chaussée par la calcite et mise en charge.
Terrain sensible à la dissolution ou au gonflement – tassement des fondations – fortes charges d'eau dans le massif encaissant.

Conséquences, évolutions possibles

Les dégradations peuvent progresser très vite si la chaussée est faiblement dimensionnée et mal drainée.

Dangers pour les usagers

De l'inconfort jusqu'à la perte de contrôle (motos, vélos).

Risques pour les structures

Les déformations de la chaussée provoquent le roulis des poids-lourds avec risque de frottements ou de chocs au niveau des reins de la voûte, ou d'accrochage d'équipements en calotte.

Surveillance

Examen visuel (surveillance continue).

Remèdes

Réparation localisée – réfection complète avec drainage.

Observations

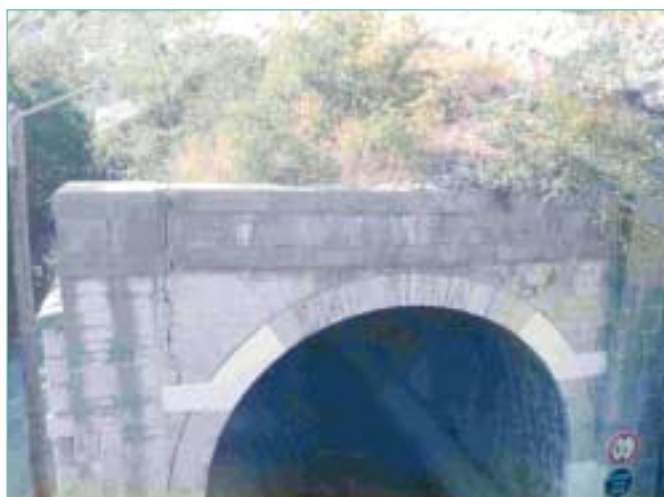
Informations complémentaires

Les structures construites présentent des désordres caractéristiques :

- **anciens tympans en maçonneries** : tassements, basculements (séparation d'avec le corps de voûte), fissures ;
- **fausses têtes à l'air libre** : présence fréquente de fissures obliques en intrados (torsion de la structure par tassement) ;
- **tous les types de têtes** : épaufrures causées par des chutes de pierres, désorganisations locales de maçonneries par la végétation ;
- **ouvrages modernes** : les habillages en panneaux préfabriqués, scellés par chevilles ou fixés sur un squelette métallique, sont sensibles aux chocs. La corrosion des pièces métalliques cachées est à surveiller.



Tête déformée par un glissement du versant




Fissuration et basculement latéral d'un mur tympan, chambre d'éboulis non curée



Rupture d'un habillage due à un choc de poids-lourd

Description (aspect visuel du désordre)

Tête naturelle : instabilités rocheuses dominant les voies ().

Têtes construites : désordres courants des maçonneries et des bétons – encombrement et surcharge des chambres d'éboulis – défauts d'étanchéité – altérations météoriques.

- spécifique aux maçonneries : décollement du tympan, basculement, tassement – déchaussements de moellons par la végétation (racines);
- spécifique au béton : instabilité des habillages extérieurs rapportés.

Méthodes d'examen

Examen visuel (nacelle indispensable).

Paramètres à relever

Tout indice d'instabilité de l'ensemble de la structure ou de certains de ses éléments, particulièrement les couronnements en pierre de taille et les habillages – état du remplissage de la chambre d'éboulis (quand elle existe).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Stabilité des abords immédiats.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Vieillessement des matériaux – tassement des fondations – actions du versant – chocs de poids-lourds hors gabarit.

Conséquences, évolutions possibles

Ruptures locales ou d'ensemble, ruine.

Dangers pour les usagers

Chute d'éléments de maçonnerie – risques souvent forts à cause d'accès non sécurisés (talus rocheux).

Risques pour les structures

Nul à fort suivant le degré de vétusté de l'ouvrage et l'intensité des causes.

Surveillance

Examen visuel – témoins – fissuromètres.

Remèdes

Nettoyages périodiques des chambres d'éboulis et des dispositifs d'évacuation des eaux de surface.

Protection de la tête et des voies par filets et grillages.

Réparations à adapter aux problèmes.

Observations

Informations complémentaires

Les termes plafond, faux-plafond, dalle sont utilisés indifféremment. Il s'agit de structure de second œuvre mise en place dans le profil en travers du tunnel, et délimitant entre elles et la calotte (ou le radier) du revêtement principal un espace dédié à la ventilation du tunnel, voire à l'évacuation des usagers en cas d'incendie. Ces structures comportent toujours des joints transversaux incorporant souvent des dispositifs de protection contre le feu et d'étanchéité aéraulique.

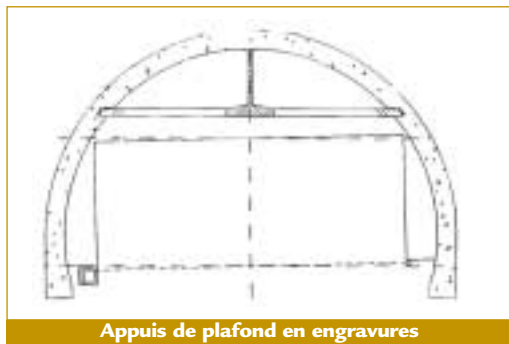
Plafonds sur appuis avec ou sans suspentes intermédiaires

La structure peut être constituée d'éléments coulés en place (plans ou voûtés) ou d'éléments préfabriqués et assemblés suivant des techniques particulières qui associent appuis latéraux et ancrages suspensifs.

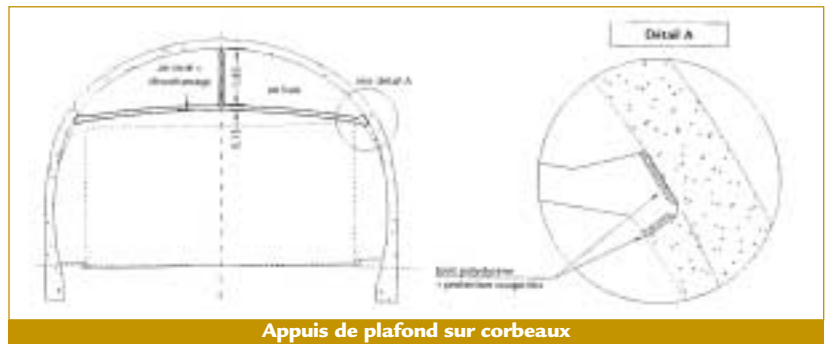
Jusqu'à ce jour, aucun désordre sérieux n'y a été signalé, mais plutôt des défauts liés à la mise en place de certains éléments.

Plafonds suspendus sans appuis

Cette technique a été utilisée dans un tunnel dont le revêtement constitué de voussoirs permettait mal la réalisation d'appuis latéraux. La dalle plane est donc simplement suspendue aux voussoirs par deux files d'ancrages apparents situés sur les cotés.



Appuis de plafond en engravures



Appuis de plafond sur corbeaux

Appuis: corbeaux ou engravures

Dans le cas d'engravures (photo), les éléments de plafond préfabriqués reposent sur les appuis par l'intermédiaire d'un joint compressible (néoprène ou polystyrène) destiné à permettre de légers déplacements dus à leur déformation.

Ce joint peut bouger à la mise en place, permettant aux bétons de venir en contact. Il y a alors un écaillage de l'appui provoqué par ces points durs, et un risque que ces écailles se détachent et tombent sur le bord des voies.

Les ragréages de finition, à but esthétique, réalisés par erreur sur ces zones, sont rapidement «éjectés» par les mouvements des plafonds.

Dans le cas des appuis continus, le béton de la dalle (talon) est en contact avec celui de l'appui, mais cet assemblage joue le rôle de rotule; les légères déformations du plafond sont absorbées par des «vides» de construction matérialisés par des plaques de polystyrène dense.

Les épaufrures observées à la base des talons de dalle ainsi conçus (photo) sont survenues au décoffrage de la dalle.

Cloisons

Les espaces réservés à la ventilation (gaines d'air frais, aspiration de l'air vicié, désenfumage) sont parfois cloisonnés.

Ces cloisons minces peuvent être coulées en place (voiles armés) ou réalisées en panneaux préfabriqués ou moellons allégés.

En gaines hautes, elles intègrent parfois les suspentes (ou ancrages) supportant la partie centrale du plafond. Cette présence peut générer une fissuration locale particulière de la cloison, voire des venues d'eau le long de la suspente.

Dans le cas de gaines situées sous la chaussée, les cloisons supportent en partie la dalle de chaussée et peuvent souffrir des mouvements de celle-ci.

Les désordres courants des cloisons sont des fissures plus ou moins accentuées au droit des joints verticaux (qui sont colmatées de produits souples), des cassures locales en tête de cloison par adhérence au revêtement de voûte ou à la dalle de chaussée. Ces désordres restent jusqu'à présent mineurs, mais demandent une surveillance régulière.



Écaille tombée sous une engravure



Épaufrure du talon de dalle

Description (aspect visuel du désordre)

- a. **Plafond (sous-face et surface)**: fissures de retrait – fissures de rupture dans les angles des dalles.
- b. **Appuis**: éclatements du béton au droit des appuis ou au contact entre éléments jointifs (préfabriqués).
- c. **Cloisons, suspentes**: fissures obliques de rupture au contact de la voûte, de la dalle – fissures de la cloison au droit des suspentes internes – corrosion des suspentes visible par des coulures de rouille.

Méthodes d'examen

Examen visuel (sauf si les suspentes sont noyées dans la cloison).

Paramètres à relever

- a. Formes particulières de fissuration liées au ferrailage, mais aussi à la forme des ouvertures pratiquées (bouches de soufflage, trappes de désenfumage, portes de communications) – état et désordres des joints de dilatation, des joints secs – tenue des ragréages – signes de corrosion des suspentes (coulures de rouille).
- b. Étendue et profondeur des éclatements au droit des appuis (noter si c'est le talon de la dalle ou l'appui qui est affecté).
- c. Position, fréquence et ouverture des fissures.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Présence de désordres particuliers dans le revêtement.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

- a. Épaisseur et densité du ferrailage.
- b. Points durs entre dalle et appui – manipulations de pose (préfabriqués) – déformations thermiques des éléments.
- c. Jeu insuffisant entre tête de cloison et revêtement.

Venues d'eau dans les gaines et corrosion des suspentes sont des facteurs aggravants.

Conséquences, évolutions possibles

- a.b. Éclatements du béton en sous face par corrosion des armatures trop proches.
- c. Pertes aérauliques.

Dangers pour les usagers

- a.b. Chute d'écaillés sur les cotés des voies
- c. Aucun

Risques pour les structures

- a.b. Affaiblissements à long terme.
- c. Rupture par surpression aéraulique (rare).

Surveillance

Examen visuel (partie circulée et gaines).
Éventuellement, mesures de corrosion sur suspentes.

Remèdes

Éclats ou écaillés tombés: éviter de ragréer (éventuellement protéger les armatures qui peuvent apparaître).
Cloisons: adapter la réparation à la nature du matériau et à la gravité des désordres.
Réparations à adapter aux problèmes.

Observations

Informations complémentaires

Ces dispositifs, mis en place à l'intrados, concernent uniquement les tunnels conçus sans étanchéité extradados, pour pallier les problèmes liés aux arrivées d'eau préjudiciables à l'exploitation. Ils sont mis en place généralement après la construction, sur les joints entre anneaux ou sur certaines fissures.

Par ordre chronologique d'apparition, on peut citer :

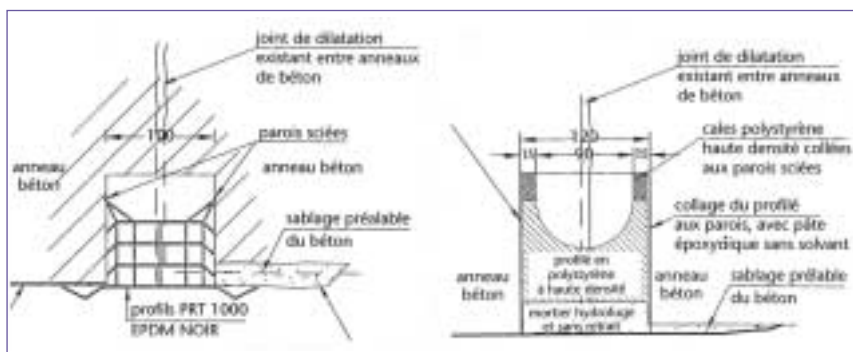
1. Les barbacanes en maçonnerie.
2. Les forages drainants (tubés ou non) en piédroits.
3. Les pontages collés sur les joints de bétonnage ou sur des fissures.
4. Les saignées dans le revêtement (demi coquilles de type ALIVA et mortier de cachetage, perfectionnés par la suite par un isolant thermique).
5. Les saignées sciées recevant un profilé drainant amovible (traitement des joints de bétonnage).

Les trois derniers dispositifs doivent être raccordés à un collecteur sous trottoir.

Les principaux désordres sont constatés sur les dispositifs de type 3 et 4. Ils se dégradent rapidement en conditions sévères par des éclatements dus au gel, ou par colmatage rapide par des fines amenées par les eaux.



Le pontage est décollé, la base du captage est détruite par le gel et engorgée



Deux types de captages linéaires d'intrados



Les frottements de poids-lourds peuvent détruire le pontage et le joint amovible sous-jacent (ici, joint PRT et pontage Hypalon)

Les pontages collés sont de type résine armée ou bande Hypalon. On constate assez souvent des déchirures ou des défauts de collage amenant des fuites.

Les profilés amovibles (type PRT) ne sont réellement efficaces que si les saignées sciées sont rectilignes et ont des lèvres très régulières. Malgré cela, ces dispositifs étant utilisés en tunnels anciens, la porosité du béton laisse passer l'humidité aux abords du joint.

Même si le dispositif recueille la plus grande partie de l'eau, il ne constitue pas un étanchement mais simplement un captage linéaire toujours susceptible de fuir.

Les dispositifs amovibles installés en tunnels routiers sont rarement déposés pour nettoyage car nombre d'entre eux sont sécurisés par des frettes métalliques vissées dans le béton. De plus, la remise en place du profilé dans sa saignée peut être difficile, ce qui occasionne des fuites latérales supplémentaires.

Dans les tunnels ainsi équipés, les frottements des PL au niveau des reins arrachent ou cisailent les pontages et les joints amovibles, y compris les protections métalliques fixées à titre préventif.

En climat rigoureux, les fuites de ces dispositifs provoquent la formation de stalactites de glace qui doivent être purgées quotidiennement ; au cours de cette opération, le dispositif est souvent blessé ou décollé.

Description (aspect visuel du désordre)

Blessures, décollements, arrachements, colmatages, fuites.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Il faut s'assurer que les eaux captées s'écoulent bien jusqu'au collecteur et que celui-ci n'est pas engorgé.

Paramètres à relever

Exutoires des fuites – linéaire humide du joint – à la faveur de décollements, rechercher un éventuel engorgement par la calcite ou des fines – hauteur d'arrachement par les poids-lourds.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Altérations du support.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Mauvaise réalisation – terrain ou revêtement altéré amenant des fines – eau incrustante.

Causes accidentelles.

Drain sous-dimensionné – périodes de gel prononcé.

Conséquences, évolutions possibles

Aucune pour la structure, mais gêne à l'exploitation.

Dangers pour les usagers

Eau (ou glace) sur la chaussée.

Risques pour les structures

Altération localement plus rapide.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Réfection complète du drain.

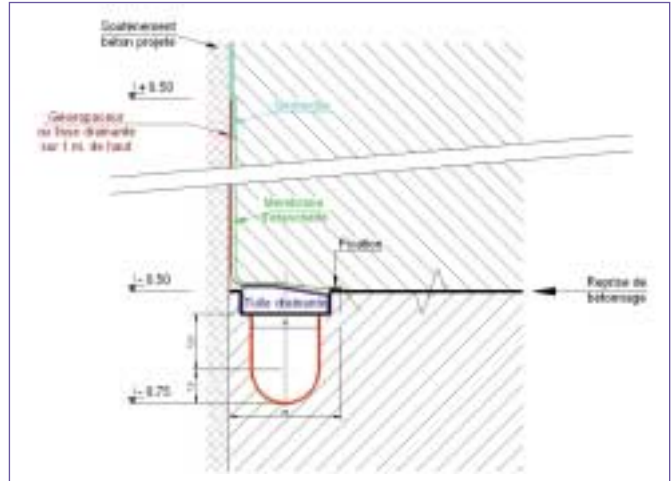
Observations

Informations complémentaires

Ce type de drain (ou caniveau) concerne les tunnels munis d'une étanchéité extrados totale au dessus du niveau des banquettes. Il est destiné à capter l'eau détournée par la feuille d'étanchéité extrados et à la ramener à un collecteur. Il est incorporé dans les banquettes de la voûte et à un niveau inférieur à la chaussée finie (de l'ordre de 1 m). Il n'est accessible pour curage qu'au droit des niches aménagées à cet effet dans les piédroits; un branchement au collecteur principal existe dans chacune d'elles.

Suivant l'âge du tunnel, il peut être constitué par des drains en PVC renforcés, en polyéthylène ou par un caniveau recouvert de dalles en béton ou de tuiles métalliques drainantes.

Son examen sort du cadre de l'inspection détaillée classique; il ne peut être réalisé que par vidéo-endoscopie, opération sous traitée à des entreprises spécialisées.



Coupe d'un caniveau drainant en base de feuille d'étanchéité

Défauts et désordres courants

Ils sont mis en évidence par les vidéo-endoscopies.

Malfaçons de chantier, négligences :

- en drains PVC : écrasement accidentel lors du bétonnage de la banquette : anciens dispositifs par drains « agricoles » trop fragiles (années 1980) abandonnés au profit des caniveaux coffrés;
- en caniveaux coffrés : décalages verticaux et horizontaux lors du coffrage formant barrages, corps étrangers de toute nature, fortes variations de sections, basculement des tuiles métalliques ou des dalles de couverture, coffrages oubliés obturant totalement le drain : au total, ces défauts ou malfaçons représentent 50% des dysfonctionnements.

Concrétions, dépôts : voir fiches correspondantes.

Exemples de caniveaux engorgés de débris de chantier



Description (aspect visuel du désordre)

Concrétionnement par de la calcite ou engorgement par des fines (visible au droit des niches de piédroits).
Ecrasement des drains circulaires (visible uniquement par endoscopie).

Méthodes d'examen

Lors de l'IDP, s'astreindre à une observation des exutoires et de leur état d'engorgement. On peut ainsi arriver à découvrir un problème et cerner sa répartition dans le tunnel.

Paramètres à relever

Nature du remplissage visible (concrétions de calcite dure, dépôts et débris divers) – quantité (réduction de la section du drain).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Humidité locale anormale.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Le concrétionnement peut avoir 2 origines (non exclusives l'une de l'autre) :

- eau naturellement chargée en carbonates (massifs calcaires) ;
- eau s'étant enrichie en carbonates par lessivage des bétons du soutènement (tunnels récents).

Les dysfonctionnements des drains résultent souvent de malfaçons ou de négligences à la réalisation.

Conséquences, évolutions possibles

Mises en charge locale, humidité apparente en partie circulée.
Perte de la fonctionnalité.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Aucun.

Surveillance

Examens périodiques aux débouchés.
Vidéo-endoscopie à la faveur des opérations d'entretien spécialisé.

Remèdes

Curages à l'eau sous pression, curage renforcé à la fraise.
Réalisation d'un nouveau drain contournant la zone obturée (opération lourde parfois nécessaire)

Observations

Voir aussi fiche 1 (Concrétions).

Informations complémentaires

Les drains de chaussée, longitudinaux et/ou en épis, sont mis en place dans la fondation de la chaussée, et enrobés de bétons poreux. Ils sont destinés à capter les eaux basses et les renvoyer à un collecteur.

Ils ne sont plus visibles sauf à leur débouché dans un regard donnant accès au collecteur principal. Au nombre de 1 ou 2, ils sont le plus souvent longitudinaux, et parfois complétés par des drains en épis. Ils sont situés entre 0,5 et 1 m sous la chaussée finie.

Principe d'investigation

Localiser exactement les différents drains, collecteurs, conduites à l'aide des plans d'exécution.

S'astreindre (avec l'accord et l'aide de l'exploitant) à soulever tous les tampons, dalles, permettant une observation des exutoires et de leur état d'engorgement. On peut ainsi arriver à découvrir un problème et cerner sa répartition dans le tunnel.

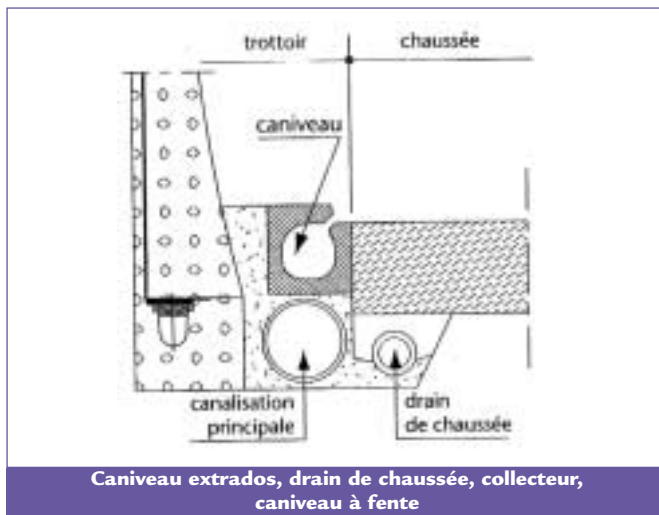
Toute humidité en chaussée (et ne provenant pas de la voûte) doit faire suspecter un engorgement de drains profonds.

Principaux désordres

Ce type de drain capte une partie des eaux qui percolent au travers des bétons maigres (drainants et autres) présents dans les fondations des chaussées. Elles s'enrichissent en bicarbonate dissous (provenant de la chaux des bétons), lequel se dépose immédiatement sous forme de carbonate (calcite) à son arrivée dans le drain. Le dépôt sera plus important si les eaux sont déjà issues d'un massif à dominante calcaire.

Ces drains de faible diamètre (100 à 150 mm) peuvent se colmater très rapidement. Ils n'ont pas toujours été conçus pour être curés périodiquement.

Le concrétionnement calcaire représente 75% des dysfonctionnements, le reste étant dû à des dépôts divers.



Description (aspect visuel du désordre)

Humidité en chaussée non liée à des venues d'eau de la voûte.
Engorgement, écrasement ou rupture des drains circulaires (*visible uniquement par endoscopie quand elle est possible*).

Méthodes d'examen

Lors de l'IDP, tenter d'examiner leurs exutoires s'ils sont accessibles (état d'engorgement).

Paramètres à relever

Nature du remplissage visible à leur débouché dans les regards (concrétions de calcite dure, dépôts divers) – quantité (réduction de la section du drain).
Surface de chaussée affectée par l'humidité (noter les PM).
En chaussée souple : exutoires apparents (ponctuels ou diffus).
En chaussée rigide (BAC) : exutoires reflétant la fissuration, jets d'eau en pression.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Types de désordres affectant la chaussée (fissures, bombements, tassements...).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Charge minérale des eaux, soit naturelle, soit acquise à la traversée des bétons poreux enrobant les drains.

Conséquences, évolutions possibles

Mises en charge locale, humidité apparente, dégradation des couches de chaussée par remontées d'eau.
Perte de la fonctionnalité.

Dangers pour les usagers

Chaussée localement humide (avec risque de verglas aux entrées).

Risques pour les structures

Aucun.

Surveillance

Examen visuel (surveillance continue) – noter les PM des résurgences et leurs déplacements éventuels.
Vidéo-endoscopie à la faveur des opérations d'entretien spécialisé.

Remèdes

Nettoyage haute pression – hydro curage (quand ces drains sont accessibles, ce qui est rarement le cas).
Réalisation d'un nouveau drain contournant la zone obturée (opération lourde parfois nécessaire).

Observations

*Jusqu'à présent, les drains de chaussée ne sont pas conçus pour être tous accessibles et curables.
Voir aussi fiche 1 (Concrétions).*

Informations complémentaires

Les feuilles d'étanchéité en PVC thermo-soudé et spitées au support sont destinées, dans les tunnels modernes, à éviter aux eaux du massif de venir au contact du revêtement principal.

Des désordres comme des venues d'eau, mais aussi des zones sonnantes le creux sont apparus au sein des anneaux de béton coffré. Ils peuvent avoir pour origine:

- une feuille posée trop «lâche» (densité insuffisante de points de fixation): la montée du béton dans le coffrage provoque la formation de plis qui peuvent se rapprocher du coffrage et générer une zone sonnante le creux très locale;
- une feuille posée trop «tendue»: la montée du béton dans le coffrage au droit de hors profils tend la feuille au delà de sa limite d'élasticité; le béton passe derrière la feuille déchirée, la rabattant parfois contre le coffrage ou à proximité immédiate de celui-ci (quelques mm ou cm); on aura dans ce cas une zone sonnante le creux de grande étendue (1 à 40 m² parfois);
- un objet métallique non recépé amorçant la déchirure de la feuille.



Repli de feuille - zone sonnante creux locale

Une fois la voûte décoffrée, la feuille échappe à tout contrôle *a posteriori*, sauf si pour une raison accidentelle quelconque, elle se trouve ramenée à l'intrados, et visible au décoffrage.

Suivant la méthode de fixation et la conduite du chantier, la feuille blessée ou déplacée, va créer des discontinuités anormales au sein du béton, voire affaiblir localement un anneau.

Ces configurations locales sont susceptibles, à moyen ou long terme, d'accélérer le vieillissement de la structure, que la feuille soit percée ou non.

Description (aspect visuel du désordre)

Visibles : la feuille PVC apparaît à l'intrados au décoffrage de l'anneau sur une surface variable (de 0.5 dm² à plus de 1m²). Elle est parfois blessée.

Invisibles : une zone de béton coffré **sonnant le creux** peut être l'indice d'un déplacement de la feuille, d'une déchirure ou d'un pli ; il existe donc une discontinuité (assimilable à un vide) au sein du béton de l'anneau.

Méthodes d'examen

Auscultation marteau systématique de l'ensemble de l'intrados, même si aucun défaut n'est visible.

Auscultation radar, permettant en outre de mettre en évidence des objets situés à plus grande profondeur (cintres).

Paramètres à relever

Surface des zones affectées.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau, fissures humides, fissures d'ouverture et de tracé anormaux, faïençage très prononcé et local.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

La montée du béton dans le coffrage plaque en principe la feuille au support ; les désordres apparaissent en cas de feuille trop ou pas assez tendue entre ses fixations.

Conséquences, évolutions possibles

La présence d'une discontinuité dont la position est aléatoire dans l'épaisseur du revêtement peut conduire à un comportement anormal de celui-ci à long terme.

Dangers pour les usagers

Aucun.

Risques pour les structures

Viellissement accéléré - désordres supplémentaires si l'eau est présente très près de l'intrados (gel prolongé).

Surveillance

Surveiller l'apparition de venues d'eau en plein anneau béton.

Remèdes

Feuille apparente : la réparation est faite pendant le chantier (piquage, reconstitution de l'étanchéité, ragréage).

Feuille invisible : aucun tant qu'un désordre n'est pas décelé.

Observations

Voir aussi fiche 11 (Zones sonnant le creux).

Informations complémentaires

L'appellation générique de tôle parapluie englobe des dispositifs en tôle galvanisée, en fibro-ciment ou en plastique.

Ils sont constitués d'éléments minces, le plus souvent ondulés et cintrés au rayon de l'intrados, fixés à la voûte par l'intermédiaire de lisses ancrées dans le revêtement. Les tôles sont rarement fixées contre la voûte. L'espace annulaire est au moins de 5 cm.

Ce procédé déjà ancien est encore utilisé dans de nombreux tunnels dans les zones de calotte les plus humides; il permet de supprimer les venues d'eau sur la chaussée en les renvoyant sur les cotés.

Outre leur vulnérabilité, les tôles ont l'inconvénient de masquer certains désordres liés à l'humidité. En cas de doute sur la stabilité du revêtement (ou de l'excavation), tout examen nécessitera la dépose d'une ou plusieurs tôles.



Panneaux en fibro-ciment.

On note l'oxydation importante des lisses de soutien, et la rupture d'une fixation



On note la perte d'un élément métallique, ainsi que la rupture des ancrages

Description (aspect visuel du désordre)

Déformation ou déchirure due à des chocs.

Perforation par oxydation, rupture des fixations sur les lisses, rupture des ancrages de lisses par corrosion.

Méthodes d'examen

Examen visuel – vérifier à la main un battement éventuel des éléments de tôles.

Observer l'espace entre tôles et revêtement (ou rocher).

Paramètres à relever

Degré d'oxydation des ancrages et des lisses (perte de métal).

Degré d'oxydation des tôles (perte de galvanisation) ou d'altération (autres matériaux).

Mauvais alignement ou recouvrement des ondes (tôles ondulées).

Désordres ou défauts associés à rechercher

Présence de matériaux tombés surchargeant leur extradados (volumes à estimer au ml).

Altération du revêtement, venues d'eau extradados.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Permanentes (altérations diverses) ou accidentelles (chocs).

Faible gabarit de l'ouvrage (chocs de PL) – ancienneté des dispositifs (corrosion).

Conséquences, évolutions possibles

Perte d'accrochage des tôles conduisant à leur battement voire à la chute d'éléments.

Venues d'eau sur la chaussée.

Dangers pour les usagers

Dommages aux véhicules de grand gabarit – risque consécutif à des chutes d'éléments.

Risques pour les structures

Ruine progressive du dispositif.

Surveillance

Examen visuel.

Remèdes

Remplacement des éléments, voire des lisses et ancrages.

Observations

Informations complémentaires

La forte humidité de certains tunnels anciens, gênante pour l'exploitation, a conduit à mettre en œuvre des «étanchéités intrados» sous la forme de films de résine polyuréthane fins (1 à 2 mm au plus), qui s'apparentent à un cuvelage. Les désordres sont apparus rapidement du fait de la pression de l'eau s'exerçant entre le revêtement et le film. Suivant la qualité de son adhérence et de son élasticité, qui se dégradent avec le temps, le film se décolle (cloques sous pression) puis se déchire.

Le résultat final est un intrados à nouveau humide, et difficile à nettoyer. Les venues d'eau réapparaissent à leurs exutoires initiaux. Là où ces pellicules subsistent, elles maintiennent une saturation permanente du support, préjudiciable en cas de gel. Si cette technique est adaptée aux réservoirs, elle ne l'est pas pour les tunnels. Elle n'est d'ailleurs plus utilisée.



Dégradation d'un film de résine posé sur maçonnerie



Cloques du film de résine avec eau sous pression



Éclatement d'un cuvelage sous l'effet du gel

Description (aspect visuel du désordre)

Cloques de décollement sous pression – éclatement des cloques sous l'effet de la pression ou du gel.
Après quelques années, le produit perd sa souplesse et devient fragile.
Concrétions au droit des blessures du film étanche.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Y a-t-il de l'eau en pression dans les cloques?

Désordres ou défauts associés à rechercher

Altération du support au droit des blessures du film.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

L'eau du massif parvenant à l'intrados est piégée par le film étanche.
Décollement, mise en pression, éclatement sous l'effet de fortes charges d'eau – effet du gel prépondérant sur le décollement.

Conséquences, évolutions possibles

Réapparition des venues d'eau et des concrétions – parement sale.

Dangers pour les usagers

Aucun sur du béton – en maçonneries, dégradation du support éventuellement plus prononcée.

Risques pour les structures

Altération plus rapide du support du fait de la saturation permanente à l'arrière du film.

Surveillance

Visuelle.

Remèdes

Nettoyage sous pression – enlèvement des parties de cuvelage très abîmées.
Recherche d'une autre solution ponctuelle ou globale suivant l'étendue et les débits.

Observations

Informations complémentaires

Les enduits sont des revêtements minces de mortier (1 à 3 cm) mis en place après la construction de la voûte afin d'assurer une certaine étanchéité, ou beaucoup plus tard à titre curatif, sur un revêtement présentant une trop forte humidité ou une altération anormalement rapide.

Leur formulation riche en ciment leur confère une grande compacité (module élevé) et une certaine imperméabilité (adjuvants hydrofuges).

Plusieurs désordres peuvent les affecter :

- perte progressive d'adhérence au support, due à sa mauvaise qualité, à l'action des eaux bloquées par l'enduit, à la « respiration » thermique de la voûte (déformations saisonnières cycliques), à l'action du gel ;
- fissuration de l'enduit dont la rigidité ou le comportement thermique sont différents de ceux du support ;
- attaques chimiques internes du support générant des gonflements décollant l'enduit ;
- chute sous forme de plaques, les enduits n'étant généralement pas armés. Lorsqu'ils le sont, souvent par des grillages fins, ceux-ci sont complètement oxydés.

En se décollant, les enduits peuvent « emporter » une partie du support altéré, augmentant ainsi la masse susceptible de tomber. Leur auscultation rapprochée demande donc certaines précautions.



Enduit sur béton ancien, fissuré et décollé



Enduit tombé (voûte en briques de tunnel canal)

Description (aspect visuel du désordre)

Défaut d'adhérence au support (zones sonnante le creux).
Fissuration particulière de type faïençage.
Cloquage et/ou chute de parties d'enduit.

Méthodes d'examen

Examen visuel, auscultation et investigation au marteau.

Paramètres à relever

Épaisseur moyenne de l'enduit – présence d'armatures ou de grillage – extension et position des zones sonnante creux – adhérence aux limites – présence d'instabilités localisées sur les faïençages – valeur du décollement de l'enduit encore en place au droit des chutes d'éléments.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau ponctuelles – fissures de grande extension, ouvertes – mauvaise qualité du support et/ou de l'enduit.
Efflorescences blanches sur/sous l'enduit.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Généralement plus riche en ciment que le support, et souvent destiné à l'étanchéité, l'enduit n'a pas la même inertie thermique que le support, ce qui est source de décollements, rapidement aggravés par l'eau (ou le gel aux têtes).

Conséquences, évolutions possibles

Extension des décollements et cassure de l'enduit sous son propre poids.

Dangers pour les usagers

Chute de plaques importantes, pouvant entraîner une partie du support par adhérence.

Risques pour les structures

Minimes pour le support.

Surveillance

Examen visuel – auscultation marteau.

Remèdes

Purges préventives si danger .
Reconstitution ou choix d'une solution différente.

Observations

Informations complémentaires

Les complexes isolants et étanches ont été utilisés en réparation de tunnels situés en site froid.

Constitués de plaques d'ETHAFOAM (3 à 5 cm) soudées ou collées bord à bord, fixées au massif par des boulons, ces procédés doivent assurer à la fois l'étanchéité aux venues d'eau et une isolation thermique empêchant la formation de glace à l'arrière. Ils sont protégés à l'intrados par des tôles parapluie (anti vandalisme et accrochage) ou par un revêtement de béton projeté et treillis soudé.

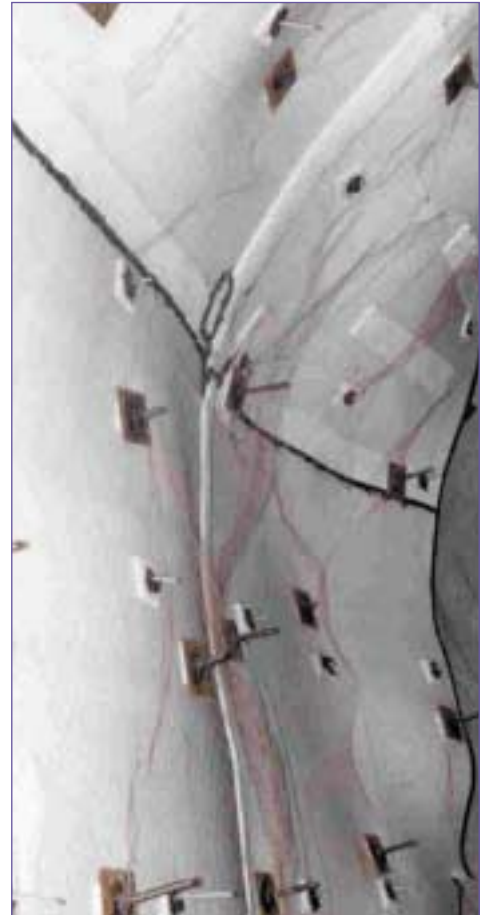
Dans ce dernier cas, concernant deux tunnels inspectés, on a pu constater la réapparition de l'humidité; les causes peuvent être soit des malfaçons dans l'assemblage des plaques semi-rigides, soit des défauts de collage localisés, soit des décollements sous l'effet de la projection du béton.

Les inspections démontrent que l'étanchéité n'est jamais totalement assurée, ce qui nécessite des interventions d'étanchement ponctuelles (et difficiles) au fil du temps.

Cette technique de réparation est actuellement remplacée par celle des coques auto-stables, qui garantissent une totale étanchéité.



Ouvrage fini après quelques années d'exploitation



Isolation étanche Ethafoam avant mise en place du treillis soudé et projection du béton

Description (aspect visuel du désordre)

Le produit est invisible, caché par un revêtement final (tôles, béton projeté).

Le désordre principal est l'humidité qui apparaît dans le revêtement ou en base de la protection.

Méthodes d'examen

Examen visuel.

Paramètres à relever

Localisation, densité, débit des venues d'eau.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration (cas du béton projeté).

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Malfaçons à la pose – perforation accidentelle en cours de chantier.

Conséquences, évolutions possibles

Perte de la capacité étanche et du pouvoir d'isolation (dispositif installé généralement dans tunnels exposés à un gel fort et prolongé).

Dangers pour les usagers

Formation de verglas au droit des fuites.

Risques pour les structures

Aucun en l'absence d'autres désordres.

Surveillance

Visuelle.

Remèdes

Étanchements ponctuels par injections.

Observations

Rédaction :

Ce document a été rédigé par Michel Imbard, avec la participation de :

Philippe Sardin, Michel Deffayet, Christian Choquet, Catherine Larive, Alain-Alexandre Robert, Gilles Hamaide, Gilles Chatenoud, ainsi que Patrick Bouguet, Alain Mercusot, Pascal Assey (dessins).

Nous remercions MM. Bruno Godart et Loïc Divet (LCPC), la Société Norisko, pour leurs contributions ponctuelles.

Crédits photos :

Centrale d'Inspection du CETU – SOMES Assainissement (fiches 39 et 40).

Coordination CETU :

Josyane Comas (chargée de communication).

Conception et réalisation :

PAO CONCEPT – 69270 Fontaines-sur-Saône

Diffusion :

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand - 69674 BRON Cedex

Téléphone: 33 (0)4 72 14 34 00

Télécopie: 33 (0)4 72 14 34 30

Mél: cetu@equipement.gouv.fr

<http://www.equipement.gouv.fr/cetu>

Ce document est la propriété du Centre d'Études des Tunnels et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur (ou de ses représentants autorisés).

© 2004 CETU

Dépôt légal : 4^e trimestre 2004

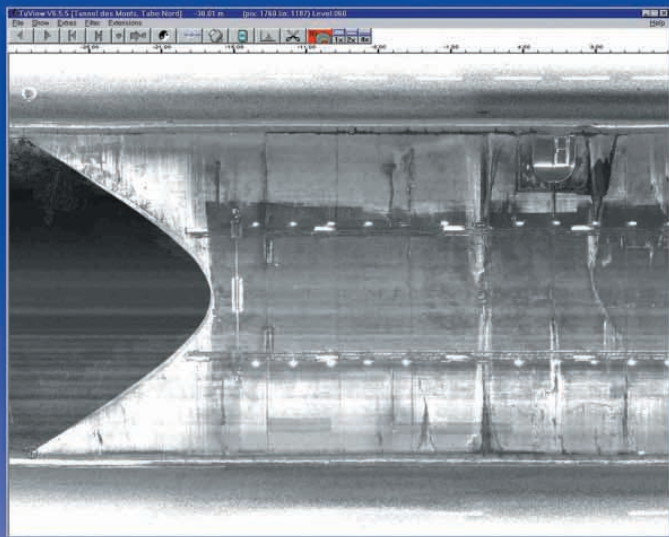
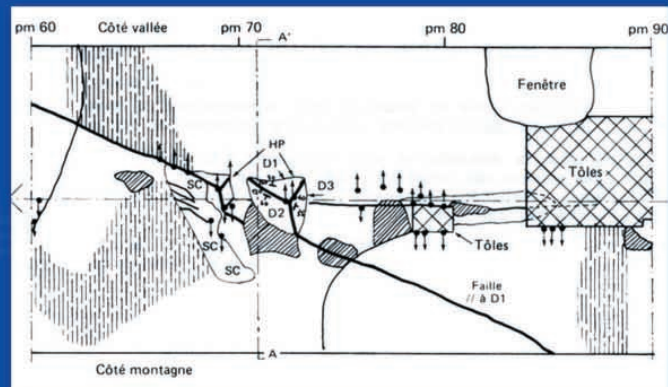
ISBN : 2 - 11 - 084749 - 2

du tunnel ancien ...



... à l'ouvrage moderne

du levé manuel ...



... à l'image numérique

Savoir voir & Savoir quoi voir