

# GUIDE DE L'INSPECTION DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS ROUTIERS

## LIVRE 2 : CATALOGUE DES DÉSORDRES



## AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

# GUIDE DE L'INSPECTION DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS ROUTIERS

## *LIVRE 2 : CATALOGUE DES DÉSORDRES*

janvier 2015

### Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 BRON - FRANCE

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

[cetu@developpement-durable.gouv.fr](mailto:cetu@developpement-durable.gouv.fr)

[www.cetu.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr)

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. Avant-propos</b>	<b>5</b>
<b>2. Catalogue des désordres</b>	<b>7</b>
2.1. Désordres liés à l'eau	7
2.2. Désordres de la zone d'influence	21
2.3. Désordres des tronçons non revêtus	29
2.4. Altérations des matériaux constitutifs des revêtements – Revêtements de maçonnerie de moellons ou de briques	37
2.5. Altérations des matériaux constitutifs des revêtements – Revêtements de béton (coulé en place ou préfabriqué)	51
2.6. Désordres des dispositifs d'étanchéité, de drainage et d'assainissement	65
2.7. Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage – Fissures	85
2.8. Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage – Déformations	97
2.9. Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage – Désordres liés à la mise en œuvre	111
2.10. Désordres des équipements de génie civil	125
2.11. Désordres liés aux incendies	131
2.12. Désordres liés à des défauts d'entretien	135

## AVANT-PROPOS

Le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » est destiné en premier lieu aux personnes chargées de réaliser les inspections détaillées du génie civil des tunnels creusés sur le réseau routier national non concédé. Il s'adresse également aux maîtres d'ouvrages gestionnaires qui, à des degrés divers, participent à l'organisation et à l'exploitation des actions de surveillance. Ce guide peut aussi servir de référence à tout autre maître d'ouvrage en charge de structures de même type.

Le premier livre du guide, intitulé « Du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation », fournit des conseils pour établir des procédures et des démarches pratiques pour la constatation, l'analyse et la classification des désordres qui apparaissent sur les différentes parties d'un tunnel. Il propose aussi une méthode de cotation « Image Qualité des Ouvrages d'Art » pour les tunnels (IQA – Tunnels) qui permet de fournir deux indicateurs, l'un portant sur l'état du génie civil et l'autre portant sur la présence d'eau, qui s'inscrivent dans le processus d'évaluation périodique fixé par l'Instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA).

Le présent document constitue le second livre du guide. Intitulé « Catalogue des désordres », il reprend et complète, pour ce qui concerne les tunnels routiers, les listes établies dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers – Du désordre vers le diagnostic » édité par le Centre d'études des tunnels (CETU) en 2004. Ce « Catalogue des désordres » constitue la partie principale du guide.

L'inspection d'un ouvrage est une démarche fondée d'abord sur l'observation et la description. Le choix a donc été fait d'approcher les désordres et les défauts par leur apparence plutôt qu'au travers des facteurs qui les déclenchent.

Les désordres, comme les défauts, peuvent être très discrets ou au contraire spectaculaires, aussi bien dans leurs manifestations visibles que dans leur extension ; mais leur gravité n'est pas obligatoirement fonction de leur « visibilité ». L'eau est présente dans un bon nombre de cas. Il est nécessaire de rechercher l'origine de ces désordres ou défauts, si possible pendant l'inspection. Leur gravité et leur évolution dépendent presque toujours d'une combinaison entre des causes dites « internes », liées aux caractéristiques intrinsèques des matériaux de soutènement, d'étanchéité et de revêtement que l'on pourrait assimiler à des « faiblesses », et des causes dites « externes », liées au milieu ambiant, au comportement du massif encaissant, aux fonctions de l'ouvrage, que l'on pourrait qualifier d'« agressions ».

Bien évidemment, comme les ouvrages anciens posent beaucoup plus de problèmes, les données concernant leurs désordres y sont plus nombreuses.

Le catalogue se compose de fiches décrivant les principaux désordres et défauts constatés dans les tunnels routiers et la manière de les détecter, de les identifier et de les évaluer. Sur chaque fiche apparaissent :

- l'appellation du désordre (nom usuel ou coutumier),
- sa description (aspect visuel du désordre) : façon dont il se manifeste à l'œil de l'observateur,
- les méthodes d'examen ou de pré-diagnostic : manière de l'appréhender voire de le découvrir s'il n'est pas visible,
- les paramètres à relever : éléments matériels ou mesurables qui lui sont liés,
- les désordres ou défauts associés à rechercher : éléments utiles au diagnostic,
- les origines et les causes possibles : interprétations faites en fonction de la connaissance de l'ouvrage,
- les facteurs aggravants : éléments susceptibles d'aggraver ou d'accélérer l'évolution du désordre,
- les conséquences et les évolutions possibles : description de l'évolution du désordre en l'absence de travaux d'entretien ou de réparation,
- les risques pour les usagers : approche immédiate des incidents ou accidents que peuvent subir les usagers (la couleur violette du bandeau signale l'existence possible d'un danger lié à la présence du désordre),
- les risques pour les structures : approche, à court et moyen terme, des évolutions des structures (la couleur du bandeau correspond à celle de la cotation IQOA maximale qui peut être affectée au désordre),
- la surveillance : mesures à prendre et observations à faire à court et moyen terme,
- les remèdes : base de réflexion sur les traitements qui peuvent s'appliquer pour supprimer le désordre ou en ralentir l'évolution,
- les observations : éléments faisant le lien avec d'autres désordres ou précisant certains des points précédents,
- les informations complémentaires : descriptions, photographies et schémas expliquant et illustrant le désordre.

Seuls les désordres ou les défauts les plus fréquemment rencontrés dans les tunnels routiers sont définis dans ce « Catalogue des désordres ». Pour les descriptions de désordres plus rares ou affectant les ouvrages ferroviaires ou hydrauliques, on peut se reporter au « Catalogue des désordres en ouvrages souterrains » édité par l'Association française des tunnels et de l'espace souterrain (AFTES) en 2005.

Les nombreux dossiers archivés par le CETU renferment des données d'une très grande richesse par la variété des tunnels routiers (dans la nature des terrains traversés, des types de revêtements, de l'âge et de l'état de conservation) et par la diversité des désordres qui y sont décrits et photographiés. Ils permettent d'alimenter le document par de multiples illustrations issues de cas concrets.

# CATALOGUE DES DÉSORDRES

## 2.1 DÉSORDRES LIÉS À L'EAU

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres liés à l'eau</b>	
Venues d'eau	HY-1
Concrétions	HY-2
Effets du gel	HY-3
Efflorescences sur mortiers et bétons	HY-4

## VENUES D'EAU

HY-1

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit d'arrivées d'eau provenant du terrain encaissant (faille, diaclase, joint stratigraphique, totalité de la surface). Dans le cas de tunnels revêtus, elles se manifestent à travers un défaut du revêtement (fissure, trou) ou un dispositif de construction (joint, barbacane).

### Méthodes d'examen

Examen visuel

### Paramètres à relever

Localisation des venues d'eau (pour établir s'il y a une corrélation avec la géologie du terrain) – Venue d'eau sous pression ou à écoulement libre – Débit – Mesure de la température et de la conductivité (éventuellement) – Analyse de l'eau (pour déterminer son origine : nappe du terrain ou provenance d'un autre réseau)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Tunnels non revêtus : Présence de discontinuités géologiques (failles, diaclases, joints sédimentaires)

Tunnels revêtus : Obstruction des drainages – Fuites dans le système d'étanchéité – Dégradation du revêtement – Dégradation du système d'étanchement

### Origines et causes possibles

Tunnels non revêtus ou revêtus : Fluctuation ou changement dans le régime de la nappe du terrain encaissant – Fuites d'eau provenant d'un autre réseau

Tunnels revêtus : Perte ou absence d'étanchéité du revêtement – Dysfonctionnement des drains

### Facteurs aggravants

Tunnels non revêtus ou revêtus : Zones soumises au gel – Nature soluble ou altérable du terrain encaissant – Pression et/ou débit importants

Tunnels revêtus : Déjointoiement – Fissuration

### Conséquences, évolutions possibles

Tunnels non revêtus : Dissolution, lessivage ou érosion du terrain et éventuellement effondrement

Tunnels revêtus : Dégradation du revêtement (lessivage, érosion) et affaiblissement des structures – Chute d'éléments du revêtement

### Dangers pour les usagers

Chute de stalactites, de matériaux altérés – Gêne et danger pour la circulation (chaussée inondée, verglas,...)

### Risques pour les structures

Affaiblissements locaux de la structure ou du terrain (pouvant aller jusqu'à la ruine de l'ouvrage)

### Surveillance

Examen visuel

## Remèdes

Collecte et déviation des venues d'eau (pontage, gouttière, drainage avec isolation thermique)

Étanchement total

Réparation ou amélioration des systèmes d'étanchéité

Réparation par traitement du terrain et/ou du revêtement (injection)

## Observations

Voir aussi fiche HY-3 (désordres liés au gel)

## Informations complémentaires

Les venues d'eau sont d'origines diverses (nappe, fuites de réseau, diffuses ou identifiées...). Elles sont particulièrement néfastes dans les secteurs soumis au gel : elles impliquent des interventions rapides et fréquentes des agents d'exploitation.

Dans les tunnels routiers, les venues d'eau ont surtout un impact sur le matériel en place (voies, éclairage) et peuvent entraîner une gêne pour la circulation. Des dispositifs de drainage et de collecte de ces venues d'eau peuvent être envisagés avant toute intervention de réparation. On peut ainsi mettre en place un système « parapluie » permettant de détourner les venues d'eau vers la base des piédroits. Dans les tunnels en maçonnerie de moellons, cet effet « parapluie » peut être obtenu en mettant en place un enduit de mortier recouvrant un réseau de drains.



Figure 1 : venue d'eau sur un revêtement en béton projeté



Figure 2 : enduit d'imperméabilisation dégradé suite à des venues d'eau (problèmes de mise en œuvre et effet du gel)

## CONCRÉTIONS

HY-2

### Description (aspect visuel du désordre)

Concrétion calcaire : il s'agit de cristallisations solides et parfois épaisses de calcite, de teinte variable (impuretés) et adhérent sur le parement, émanant de fissures, de zones poreuses ou de joints humides

Concrétion sulfatée : il s'agit de cristallisations de gypse, dures, cassantes, souvent noirâtres (suies), parfois miroitantes, sur des joints ou des fissures

### Méthodes d'examen

Examen visuel

### Paramètres à relever

Disposition (points d'apparition, concrétions ponctuelles ou étendues) – Surface – 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

Autres altérations du support

Obstruction des systèmes de drainage

Cavités de dissolution

Affaiblissement de la structure par dissolution du liant

### Origines et causes possibles

Concrétion calcaire : 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

Concrétion sulfatée : sulfates pouvant être véhiculés par les eaux du terrain ou provenir des gaz de combustion (surtout tunnels ferroviaires anciens)

### Facteurs aggravants

Dissolution du liant

### Conséquences, évolutions possibles

Concrétion calcaire : extension, épaisseur croissante des dépôts pouvant conduire à des chutes de plaques

Concrétion sulfatée : 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

Traitement des venues d'eau

Voir aussi fiches HY-4 (efflorescences sur mortiers et bétons), RB-2 (altération des bétons), ED-1 (drains d'intrados), ED-2 (drains et caniveaux d'extrados) et ED-3 (drains de chaussée)

#### 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 (voir fiche RB-2).

L'épaisseur et l'étendue des concrétions 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 exutoires ponctuels ;
- draperies ou rideaux : sur exutoires linéaires (fissures, joints) ; elles sont en relief marqué ;
- nappage ou voile : le revêtement entier devient invisible sous une couche de concrétions.

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 deux types de calcite dans les dispositifs de drainage.

#### 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.



Figure 1 : concrétions calcaires encroûtantes au débouché d'un karst actif dans un tunnel abandonné

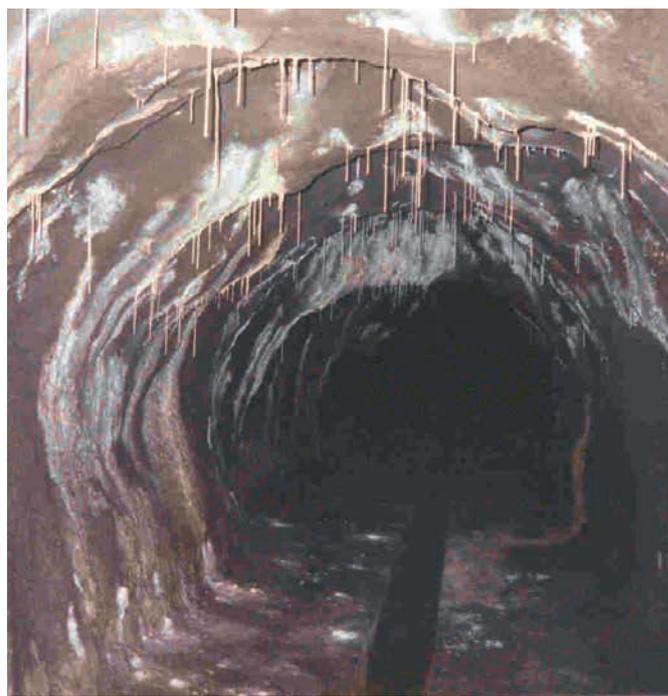


Figure 2 : stalactites et coulures de calcite blanche sur du béton projeté (dissolution de la chaux du ciment par percolation des eaux du terrain)



Figure 3 : concrétions claires de calcite (à gauche) ; dépôt de gel rouge, riche en oxyde de fer (à droite)

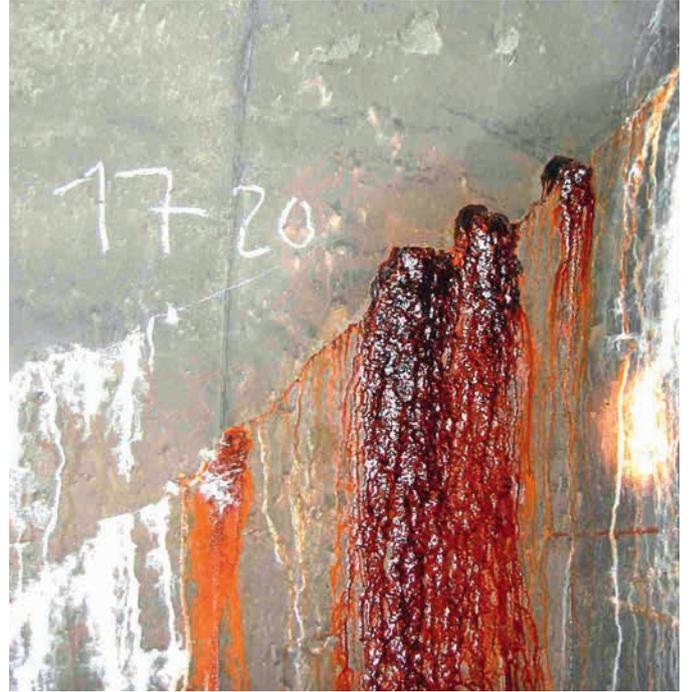


Figure 4 : fissure concrétionnée, calcite blanche et dépôts rouges-bruns

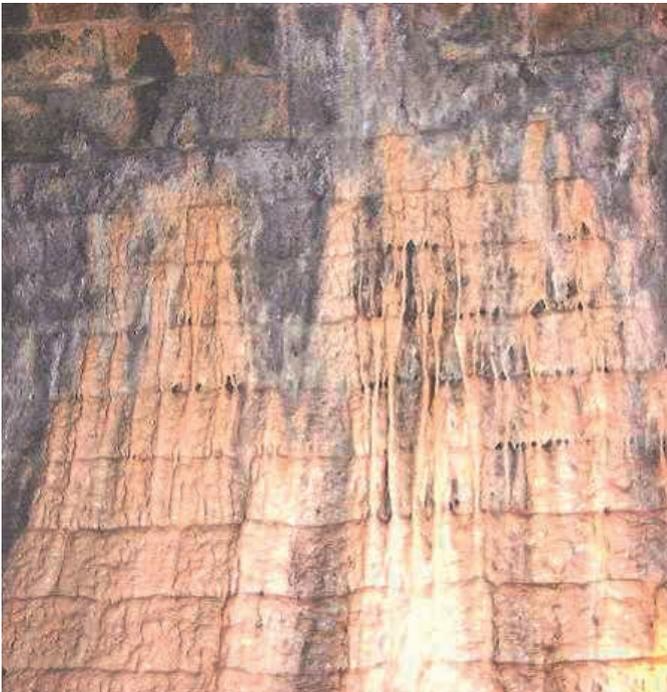


Figure 5 : concrétions de calcite sur maçonnerie de moellons



Figure 6 : concrétions encroûtantes de calcite sur maçonnerie de moellons

## EFFETS DU GEL

HY-3

### Description (aspect visuel du désordre)

Les effets du gel s'expriment sous différentes formes :

- formation de stalactites, d'amas ou de plaques de glace,
- effritement superficiel des matériaux en plaquettes, voire formation de cavités (bétons),
- éclatements de drains non isolés,
- expulsion des joints amovibles,
- soulèvement de plate-forme.

### 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

Dégradation des maçonneries – Qualité du matériau (présence de pierres gélives) – Risques d'instabilités locales – Amincissement du revêtement – Obstruction des drainages – Fuites dans système d'étanchéité

### Origines et causes possibles

Circulation d'eau dans un support poreux – Gel prolongé et fort – Nombreuses alternances gel-dégel  
Utilisation de matériaux inadaptés (béton, mortiers ou pierres gélifs)

### Facteurs aggravants

Orientation et altitude de l'ouvrage – Déjointoiement – Fissuration

### Conséquences, évolutions possibles

Affaiblissement des structures  
Dysfonctionnement des drains  
Chute d'éléments du revêtement

### Dangers pour les usagers

Chute de stalactites, de matériaux altérés, verglas sur la chaussée et les trottoirs, accessibilité réduite aux dispositifs de sécurité

### Risques pour les structures

Affaiblissements locaux (dégradation des maçonneries par éclatement)

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Purges quotidiennes des amas de glace  
Drainage avec isolation thermique  
Étanchement  
Réparation des systèmes d'étanchéité  
Rejointoiement  
Amélioration des drainages en voûte

## 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 cœur du matériau en provoquant des éclatements plus importants, un délaminage ou de la fissuration.

Il est admis que ces effets mécaniques visibles sont liés 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 éclatements.

Dans les moellons, la porosité communicante de la roche, naturelle ou due aux contraintes thermique ou structurelle, facilite l'infiltration de l'eau et fragilise le matériau vis-à-vis des effets du gel. Parmi les roches les plus sensibles, on peut citer les calcaires oolithiques, les dolomies et les grès.



Figure 1 : effets du gel sur des pierres de taille en calcaire oolithique

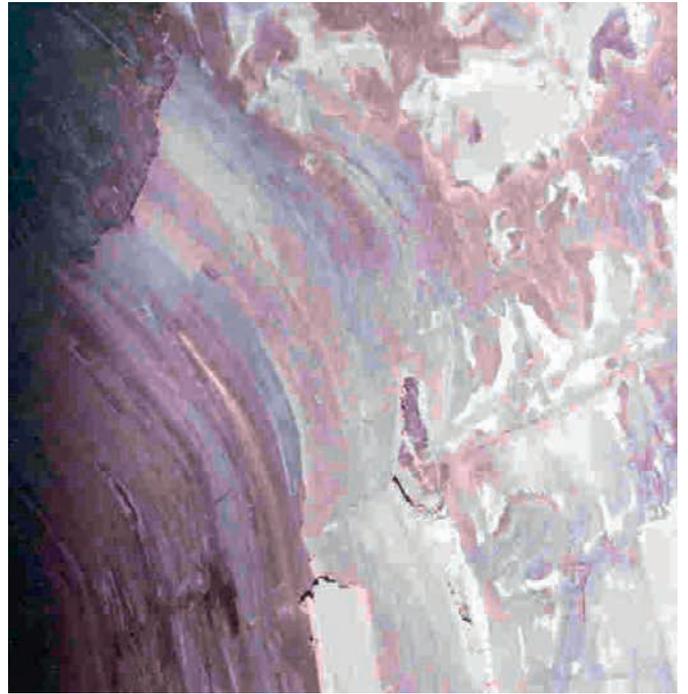
Dans un béton coffré, la présence de 5 à 8 % de bulles d'air de petit diamètre (50 à 200  $\mu\text{m}$ ) jouant le rôle de « vase d'expansion », limite les effets délétères du gel. C'est le rôle des entraîneurs d'air que de créer dans la pâte un réseau de bulles dense et stable. Pour les bétons anciens, 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 et zones exposées aux sels de déverglaçage).

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).



*Figure 2 : stalactites*



*Figure 3 : enduit décollé par le gel*



*Figure 4 : piédroit en béton armé gelé*



Figure 5 : éclatement du béton par le gel, en base de piédroit



Figure 6 : amas de glace sur trottoir provenant d'un joint

## EFFLORESCENCES SUR MORTIERS ET BÉTONS

HY-4

### Description (aspect visuel du désordre)

Les efflorescences se présentent comme des filaments blancs :

- se formant par extrusion au travers des pores du support et 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,
- apparaissant ou disparaissant très rapidement en fonction de l'humidité du support ou de l'hygrométrie ambiante.

### Méthodes d'examen

Examen visuel (à l'œil nu et à la loupe) et gustatif (goût salé)

### Paramètres à relever

Disposition (points d'apparition, zones ponctuelles ou étendues) – Surface – Nature et état d'altération du support

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Autres altérations du support – Gonflement (maçonneries ou enduits) – Décollements (enduits) – Exfoliations – Fissures – Concrétions de gypse

### Origines et causes possibles

Attaque du mortier ou du béton par des venues d'eau sulfatées, conduisant à la formation de sulfate de sodium  
Présence interne d'ettringite secondaire (à rechercher par microscopie électronique à balayage), dont la cristallisation est expansive et destructrice

### Facteurs aggravants

Mauvaise qualité d'origine du support – Eaux du terrain chargées en sulfates

### Conséquences, évolutions possibles

Gonflement interne important pouvant 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

Préventifs : essentiellement lors du choix des ciments  
Curatifs : non nécessaires au stade de l'efflorescence seule ; si la structure est fortement désorganisée par le gonflement, sa reconstruction est à envisager.

### Observations

Le terme « efflorescence » a ici un sens volontairement restrictif, afin de caractériser précisément ce type particulier d'exsudats rencontrés 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 RM-5 (altération des mortiers) et RB-2 (altération des bétons)

### 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.

#### Maçonneries :

Les efflorescences 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.

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.

#### 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<sub>2</sub>) rejeté par les véhicules sur un support humide (attaque acide).

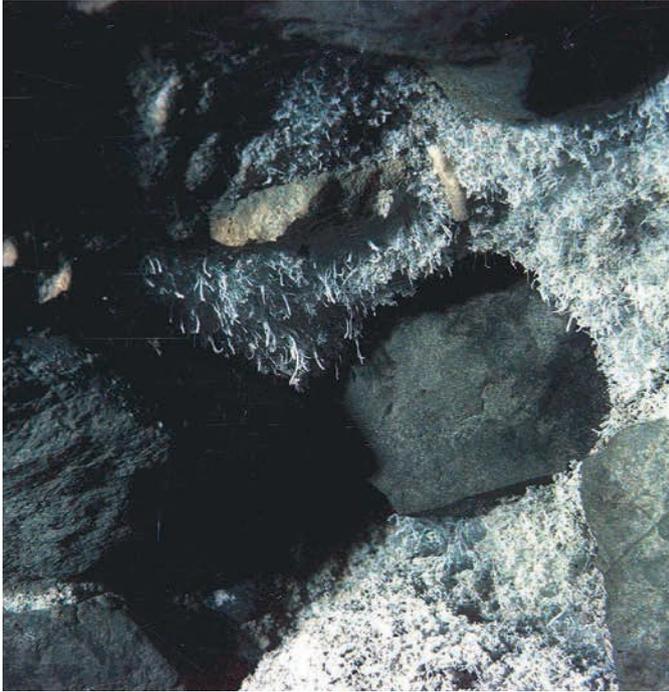


Figure 1 : efflorescences sur mortiers anciens à base de chaux



Figure 2 : efflorescences sur mortiers anciens à base de chaux



Figure 3 : efflorescences au ras du sol sur un béton de 1976



## 2.2 DÉSORDRES DE LA ZONE D'INFLUENCE

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres de la zone d'influence</b>	
Karsts et cavités	ZI-1
Désordres aux têtes	ZI-2
Instabilités de pentes	ZI-3

## KARSTS ET CAVITÉS

ZI-1

### Description (aspect visuel du désordre)

**Karst** : il s'agit d'une cavité ou d'un conduit naturel formé par dissolution du calcaire ou du gypse dont les dimensions vont de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres

**Cavité** : il s'agit d'une excavation d'origine humaine non revêtue (carrière souterraine, ouvrage militaire, galerie) ou vide naturel extensif se formant au sein d'un terrain peu cohérent par éboulement et entraînement des fines par des circulations d'eau (continues ou non)

Évidents à identifier lorsque le tunnel les recoupe, ces karsts ou cavités peuvent exister à son voisinage et avoir une influence sur l'ouvrage, sans avoir été détectés

### Méthodes d'examen

Examen visuel si le karst ou la cavité débouche en tunnel (son exploration n'entre pas dans le cadre d'une inspection)  
Reconnaitances par radar, sondages mécaniques, topométrie (nivellement, convergence)

### 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 et défauts associés à rechercher

Connaissance de débouçages antérieurs – Dolines (dépression circulaire de modelé karstique) ou lapiaz (formation créée par le ruissellement des eaux de pluie ou par les cycles gel/dégel) en surface – Affaissements de chaussée

### Origines et causes possibles

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

### Facteurs aggravants

Rocher encaissant fracturé - Karst actif (circulations d'eau) - Conduit tangentant l'intrados

### Conséquences, évolutions possibles

Débouçages, parfois brutaux et importants, des matériaux de remplissage existants ou amenés par les eaux – Effondrement localisé de la chaussée

### Dangers pour les usagers

Chutes de matériaux et/ou venues d'eau subites et violentes (si le débouché se trouve dans le tunnel)  
Risque accru si le karst est en calotte ou si un fontis remonte jusqu'à la chaussée

### Risques pour les structures

Si un revêtement existe au droit du vide, mise en charge, 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

Examen visuel :

- surveiller la fréquence et l'abondance des chutes de matériaux (karst ou cavité débouchant), l'évolution des venues d'eau et de leur charge solide,
- visite des réseaux.

Forages endoscopés (karst ou cavité cachée par un revêtement)

## Remèdes

Protection par grillage ou grille qui peut être purgée (contre les chutes de blocs présents dans le remplissage)  
Drainage dimensionné pour les débits de crues possibles et obturation résistante mais néanmoins visitable

## Observations

### 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. A 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.

Les karsts 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 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 roches fragiles dans le cas où un conduit tangente l'intrados). Outre les cavités karstiques naturelles, certains tunnels recoupent ou tangentent d'anciennes cavités créées par l'homme comme les carrières, ardoisières, canaux divers, galeries de reconnaissance...

N'ayant pas toujours été confortés ou remblayés, leur évolution généralement mal connue peut affecter la stabilité du tunnel proche. Par ailleurs, certains karsts ou cavités ont pu être masqués par le revêtement. Il convient de les rechercher (archives, mémoire), de les visiter quand cela est possible et de les explorer par forages et vidéo-endoscopie.



Figure 1 : karst rempli de matériaux mal consolidés et protection contre les chutes de matériaux par profilés métalliques

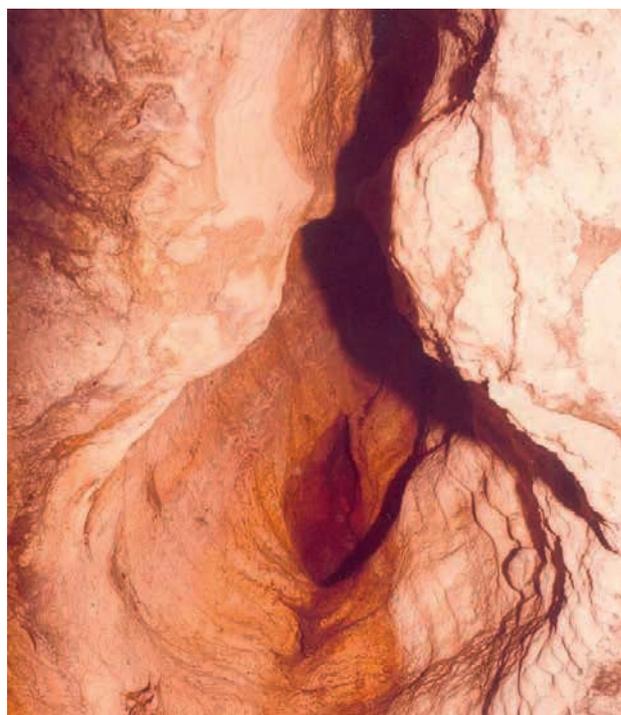


Figure 2 : conduit ouvert débouchant en calotte d'un tunnel non revêtu (on distingue les traces d'écoulements temporaires mêlés à de l'argile rouge)

**DÉSORDRES AUX TÊTES****ZI-2****Description (aspect visuel du désordre)**

Les désordres peuvent avoir diverses origines :

- têtes naturelles :
  - 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,
  - décollement, basculement ou tassement du tympan,
  - déchaussements de moellons par la végétation (racines),
  - instabilité des habillages rapportés.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel (souvent au contact)

**Paramètres à relever**

Surface affectée par les désordres – Remplissage de la chambre d'éboulis (quand elle existe) – Ouvertures des fissures – État du drainage – Qualité des matériaux du revêtement ou de l'habillage – Indice d'instabilité (particulièrement sur les éléments des couronnements en pierre et les habillages)

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Stabilité des abords immédiats – Venues d'eau

**Origines et causes possibles**

Viellissement des matériaux – Tassement des fondations – Action du versant (chute de blocs) – Choc de poids-lourds hors gabarit – Cycles gel-dégel – Développement de la végétation arbustive – Malfaçon de la pose ou absence d'étanchéité – Défaut d'entretien régulier

**Facteurs aggravants**

Zone soumise au gel – Mauvaise évacuation des eaux – Encombrement de la chambre d'éboulis

**Conséquences, évolutions possibles**

Détérioration de l'étanchéité  
Ruptures locales ou d'ensemble  
Ruine

**Dangers pour les usagers**

Chute de blocs rocheux ou d'éléments de maçonnerie  
Formation de stalactites de glace

**Risques pour les structures**

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

## Surveillance

Examen visuel

Mise en place de témoins et de fissuromètres (selon les cas)

Mise en place d'une surveillance renforcée ou d'une haute surveillance (suivant les résultats des mesures)

## Remèdes

Entretien régulier des chambres d'éboulis et des dispositifs d'évacuation des eaux de surface, débroussaillage

Protection de la tête et des voies par filets et grillages

Réparations à adapter aux problèmes (réfection, reconstruction)

## Observations

## Informations complémentaires

Les structures construites présentent des désordres caractéristiques :

- tassements, fissures,
- basculements (séparation d'avec le corps de voûte), surtout visibles sur les anciens tympans en maçonneries,
- présence fréquente de fissures obliques en intrados (torsion de la structure par tassement),
- épaufrures causées par des chutes de pierres, désorganisations locales de maçonneries par la végétation,
- chocs sur les habillages rapportés en panneaux préfabriqués, scellés par chevilles ou fixés sur un squelette métallique (la corrosion des pièces métalliques de fixation est à surveiller).

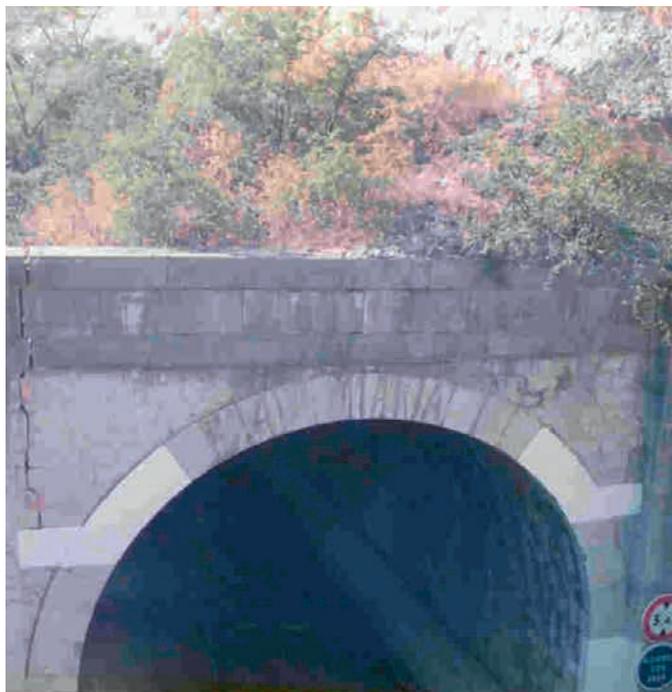


Figure 1 : fissuration et basculement latéral d'un mur tympan, chambre d'éboulis non curée



Figure 2 : tête déformée par le glissement du versant



Figure 3 : rupture d'un parement due à un choc de poids-lourd

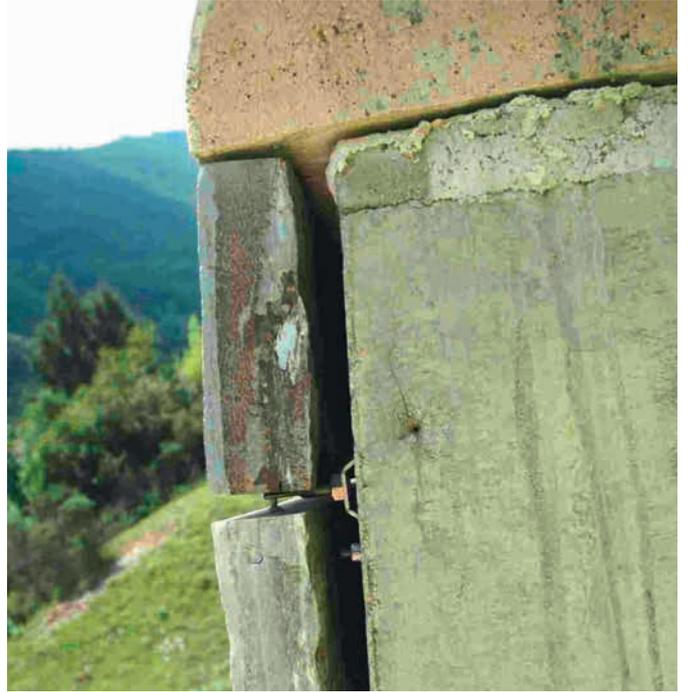


Figure 4 : fixation de l'habillage du tympan déficiente

## INSTABILITÉS DE PENTES

ZI-3

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit du déplacement généralement lent d'une masse de matériau lent, sur une pente, le long d'une surface de rupture au contact entre deux couches au sein d'une zone de terrain de plus faible résistance

### Méthodes d'examen

Examen visuel du terrain naturel et recherche d'indices (niches d'arrachement, surfaces de rupture, bourrelets en pied, végétation basculée...)

### Paramètres à relever

Estimation du volume global en jeu  
Estimation de la vitesse (pose d'inclinomètres)  
Caractéristiques hydrauliques du massif (piézomètres, sondes de pression interstitielle...)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration de l'ouvrage – Déformation de l'ouvrage – Fracturation de l'ouvrage

### Origines et causes possibles

Nature des terrains – Géomorphologie du site – Végétation – Régime hydraulique du massif

### Facteurs aggravants

Fluage – Modification du régime hydraulique de la zone (saturation des matériaux, augmentation des pressions interstitielles) – Travaux de terrassement – Erosion naturelle – Accélérations produites par des séismes

### Conséquences, évolutions possibles

Rupture locale ou d'ensemble  
Ruine

### Dangers pour les usagers

Chute d'éléments du revêtement  
Effondrement de la structure

### Risques pour les structures

Fissuration à destruction de l'ouvrage

### Surveillance

Examen visuel  
Mise en place de témoins et de fissuromètres sur l'ouvrage  
Mise en place d'une surveillance renforcée ou d'une haute surveillance  
Pose d'inclinomètres, de piézomètres, de cellules de pression interstitielle, de piézocônes dans la masse en mouvement

### Remèdes

Terrassements  
Dispositif de drainage  
Ouvrages de soutènement  
Végétalisation

## Observations

## Informations complémentaires

Un glissement est un déplacement généralement lent, sur une pente et le long d'une surface de rupture, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables.

La surface de rupture peut être courbe (glissement circulaire) ou le long d'une discontinuité pré-existante (glissement plan). La profondeur de cette surface peut varier de l'ordre du mètre à quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres dans les cas exceptionnels.

Les vitesses de glissement du terrain restent variables. Lorsqu'il y a rupture, les terrains peuvent glisser très rapidement, surtout lorsqu'ils sont saturés en eau.

Les glissements d'ampleur maîtrisable peuvent être traités par :

- terrassement (purgés et de reprofilages, réalisation de butées de pied, substitution des matériaux glissés...);
- mise en place de dispositif de drainage (collecte des eaux de surfaces, réalisation de tranchées drainantes, de drains subhorizontaux ou verticaux, de masques);
- réalisation d'ouvrages de soutènement : ces ouvrages peuvent être souples (gabions, sols renforcés) ou rigides (murs);
- végétalisation.



Figure 1 : tête déformée par le glissement du versant

## 2.3 DÉSORDRES DES TRONÇONS NON REVÊTUS

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des tronçons non revêtus</b>	
Blocs ou masses lâchés	NR-1
Plaques ou bancs fléchis	NR-2

Consulter également les fiches relatives :

- aux désordres liés à la zone d'influence: ZI-1, ZI-2, ZI-3
- aux culots de tir instables : MO-1.

**BLOCS OU MASSES LÂCHÉS****NR-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Il s'agit de blocs décollés du massif par des discontinuités (ouvertes ou non, remplies ou non).  
L'emplacement d'un bloc déjà tombé se repère par une couleur différente sur la roche.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel depuis la chaussée, avec éclairage puissant (méthode souvent insuffisante) et rapproché (au contact)  
Examen sonore par 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 et de leur orientation dans l'espace (direction, pendage) – Estimation de la maille moyenne de fracturation – Estimation des volumes unitaires et du volume global – Estimation de la surface affectée

**Désordres et défauts associés à rechercher**

Présence de matériaux de remplissage (sable, argile...) – Présence d'humidité dans les discontinuités – Présence de failles

**Origines et causes possibles**

Structure et fracturation originelle du massif – Décompression naturelle de la surface libre – Fracturation induite par les tirs anciens – Purge incomplète après excavation initiale ou alésage ultérieur

**Facteurs aggravants**

Discontinuités dont le pendage vers l'intérieur du tunnel peut faciliter un glissement des masses (profil en travers défavorable au développement de l'effet de voûte) – Faible résistance au cisaillement sur les joints rocheux – Densité importante de fracturation de la masse rocheuse

**Conséquences, évolutions possibles**

Chutes progressives par déstabilisation des blocs adjacents – Création progressive de hors profils  
Dommages aux équipements

**Dangers pour les usagers**

Chutes de blocs

**Risques pour les structures**

Fragilisation progressive de certaines parties de la voûte (suppression de butées entre blocs)  
Agrandissement naturel de la section

**Surveillance**

Examen visuel  
Actions de surveillance continue plus fréquentes (relever les PM de chutes des blocs, leur volume et leur fréquence)

**Remèdes**

Actions à adapter pour chaque tunnel :

- purges périodiques et préventives,
- protection immédiate par grillage (pour les petits blocs),
- boulonnage (pour les gros blocs),
- réalisation d'un revêtement (projection de béton).

Voir aussi fiche NR-2 (plaques ou bancs fléchis)

### Informations complémentaires

Toute excavation non revêtue évolue par ameublissement, d'autant plus rapide que la roche est fracturée ou altérable (schistes, marnes).

Le diagnostic repose sur l'observation visuelle rapprochée, sous plusieurs angles, et sur l'auscultation sonore (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 (qualitativement) le degré d'instabilité de la surface d'une excavation, dont l'aspect peut être très trompeur.

Le cas de figure le plus 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 le risque d'instabilité.

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

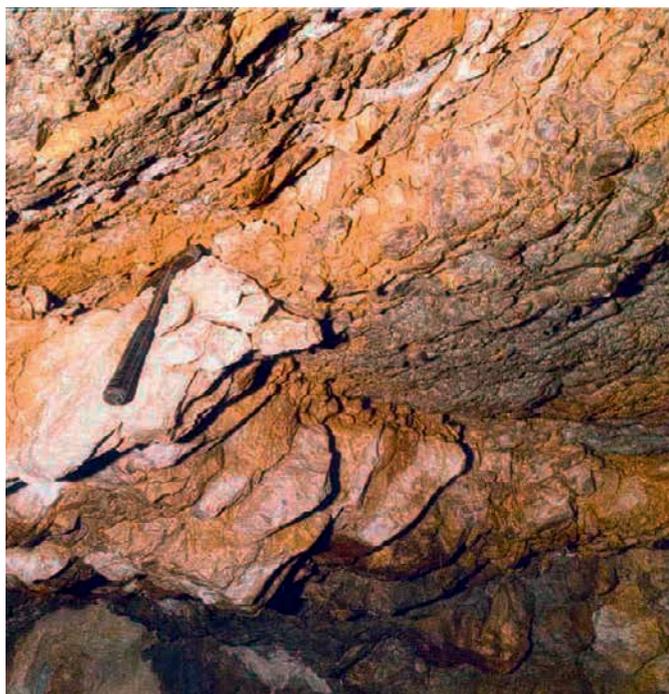


Figure 1 : masse de roche fracturée séparée du terrain par un joint argileux ou « pont de roche instable » (purge possible dans un premier temps)

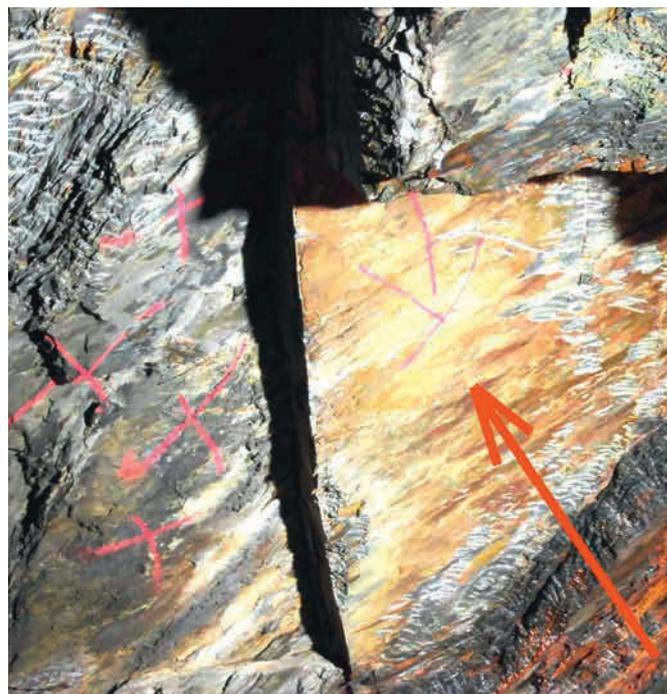


Figure 2 : dalle massive sonnante le creux à l'extrémité de bancs durs instables et présence de plaques de schistes friables



Figure 3 : instabilités résiduelles confortées par béton projeté dans la zone de l'alésage latéral

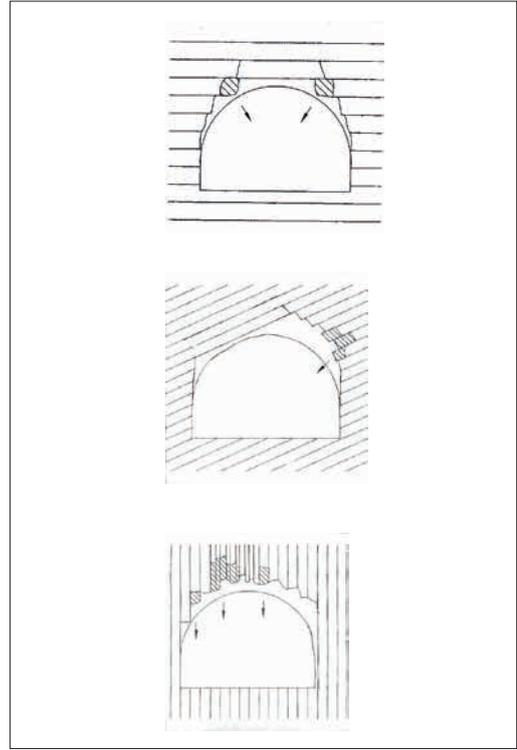


Figure 4 : masses ou blocs lâchés (volumes unitaires faibles à moyens mais multiples)

## PLAQUES OU BANCS FLÉCHIS

NR-2

### Description (aspect visuel du désordre)

Les strates ou plaques, avec un pendage nul ou très faible, se décollent du massif, fléchissent et présentent des interbancs ouverts.

### Méthodes d'examen

Examen visuel depuis la chaussée avec éclairage puissant (méthode souvent insuffisante et rapprochée au contact)  
Examen sonore par auscultation au marteau (réponse sonore de l'objet, instabilité réelle ou apparente)

### Paramètres à relever

Épaisseur moyenne des plaques – Ouverture des joints ou fissures – Déplacements relatifs des éléments – Estimation des volumes unitaires et du volume global – Estimation de la surface

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration de la dalle (affaiblissement)

### Origines et causes possibles

Origine structurale, éventuellement aggravée par le déroctage ou la forme de l'excavation

### Facteurs aggravants

Banc horizontal (en calotte) – Altération de la roche – Présence d'argile et d'humidité dans les discontinuités

### Conséquences, évolutions possibles

Rupture de la plaque apparente et chute de masses parfois importantes  
Création progressive de hors profils  
Dommages aux équipements

### Dangers pour les usagers

Chute de plaques

### Risques pour l'excavation

Agrandissement naturel de la section  
Fragilisation progressive de certaines parties de la voûte (suppression de butées entre blocs)

### Surveillance

Examen visuel  
Actions de surveillance continue plus fréquentes (relever les PM de chutes de petits blocs annonciateurs d'évolution, noter l'apparition de fissures)

### Remèdes

Actions à adapter pour chaque tunnel :

- purges périodiques et préventives,
- protection immédiate par grillage (pour les petits blocs),
- boulonnage (pour les gros blocs),
- réalisation d'un revêtement (projection de béton)

## Observations

Voir aussi fiche NR-1 (blocs ou masses lâchés)

## Informations complémentaires

C'est un désordre fréquent qui se rencontre d'abord dans les massifs stratifiés, dans les zones 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.

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 sont fragilisées et potentiellement instables : on est alors dans le cas de la fiche « blocs lâchés ».

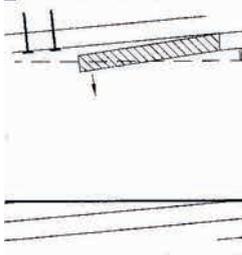
Le niveau de risque est bien sûr lié au pendage des couches par rapport à la direction du tunnel, mais aussi à la superficie de la dalle visible, sa fracturation et la présence d'interbancs argileux ou marneux. Si le banc est très homogène (calcaire le plus souvent) et épais (supérieur au mètre), ce type de désordre a peu de probabilité d'apparaître.



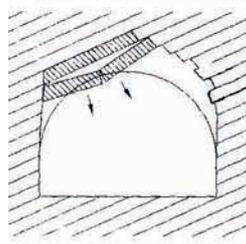
*Figure 1 : bloc tombé sur les tôles indiquant l'affaiblissement de l'extrémité d'une strate calcaire (la présence de deux discontinuités verticales et humides sur les côtés constitue une situation potentiellement dangereuse à long terme pour l'ensemble de la partie rocheuse centrale.)*



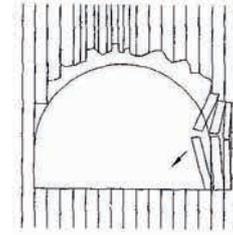
*Figure 2 : plaques décollées inclinées de 45° en rein de tunnel*



*Pendage sub-horizontale  
Fléchissement en calotte  
(coupe longitudinale)*



*Pendage oblique  
Fléchissement et rupture  
en rein*



*Pendage vertical  
Fléchissement et rupture  
en piedroit*

*Figure 3 : plaques ou bancs fléchis (les volumes unitaires peuvent être importants en roche dure, peu fracturée)*



## ALTÉRATIONS DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES REVÊTEMENTS – REVÊTEMENTS DE MAÇONNERIE DE MOELLONS OU DE BRIQUES

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Altérations des matériaux constitutifs des revêtements – Revêtements de maçonnerie de moellons ou de briques</b>	
Alvéolisation	RM-1
Desquamation	RM-2
Exfoliation	RM-3
Écaillage mécanique	RM-4
Altérations des mortiers – Déjointoiement	RM-5

ALVÉOLISATION	RM-1
<b>Description (aspect visuel du désordre)</b>	
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.	
<b>Méthodes d'examen</b>	
Examen visuel Examen au contact (auscultation au marteau)	
<b>Paramètres à relever</b>	
Profondeur moyenne de l'alvéolisation – Surface d'intrados concernée – Compacité du revêtement (sondage des moellons au marteau)	
<b>Désordres ou défauts associés à rechercher</b>	
Mauvaise qualité générale du revêtement	
<b>Origines et causes possibles</b>	
Altération superficielle des pierres gréseuses ou dolomitiques : variations d'hygrométrie, faibles actions chimiques aux dépens du ciment naturel de la roche	
<b>Facteurs aggravants</b>	
Briques de mauvaise qualité – Moellons poreux ou gélifs	
<b>Conséquences, évolutions possibles</b>	
Extension latérale ou en profondeur	
<b>Dangers pour les usagers</b>	
Aucun	
<b>Risques pour les structures</b>	
Aucun si le désordre reste superficiel et peu étendu	
<b>Surveillance</b>	
Examen visuel Mesures des profondeurs	
<b>Remèdes</b>	
Réparations à n'envisager que si le désordre affecte localement la tenue de la voûte, ce qui est très rare	
<b>Observations</b>	
À ne pas confondre avec la « desquamation » (fiche RM-2) ou l'arénisation (altération souterraine d'une roche granitique)	

### Informations complémentaires

L'alvéolisation se manifeste surtout à la surface des moellons gréseux, dont la résistance à l'altération est liée à 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), aux 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 des 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, est généralement sans aucune conséquence pour la structure. Il peut préexister en affleurement naturel.

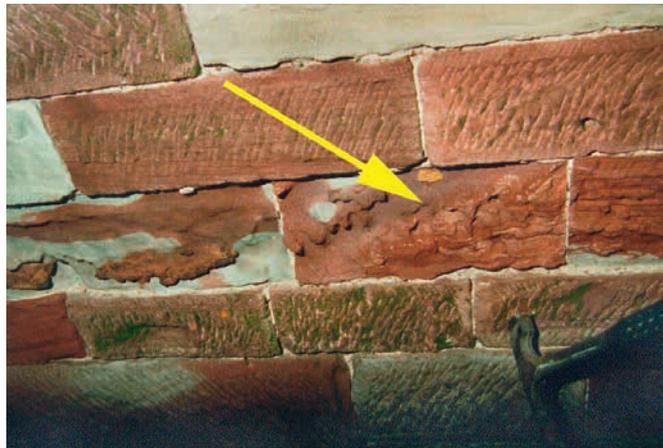


Figure 1 : moellons de grès alvéolés

DESQUAMATION	RM-2
<b>Description (aspect visuel du désordre)</b>	
La desquamation est une forme d'altération limitée au moellon lui-même. Il apparaît feuilleté en surface, les feuilletés étant fragiles et toujours d'épaisseur inférieure au centimètre (pellicule fine).	
<b>Méthodes d'examen</b>	
Examen visuel	
<b>Paramètres à relever</b>	
Nature de la pierre – Extension du phénomène (très localisé, dispersé ou extensif) – Localisation par rapport aux têtes du tunnel	
<b>Désordres ou défauts associés à rechercher</b>	
Exfoliations – Écaillages mécaniques	
<b>Origines et causes possibles</b>	
Altération de la roche constitutive du moellon par migrations de sels vers la surface	
<b>Facteurs aggravants</b>	
Pose en délit des moellons – Venues d'eau périodiques – Cycles gel-dégel – Courants d'air violents	
<b>Conséquences, évolutions possibles</b>	
Le processus de desquamation évolue par approfondissement lent	
<b>Dangers pour les usagers</b>	
Aucun	
<b>Risques pour les structures</b>	
Aucun	
<b>Surveillance</b>	
Examen visuel	
<b>Remèdes</b>	
« Nettoyage » périodique	
<b>Observations</b>	
À ne pas confondre avec l'alvéolisation (fiche RM-1)	

### Informations complémentaires

La desquamation est une altération des moellons en lamelles, peu épaisses et uniformes, parallèles au parement. Elle affecte, en général, les zones de moellons de nature semblable (souvent gréseux). Selon l'épaisseur, on parle de pellicule (1 mm), de croûte (plusieurs mm) ou de plaque (1 cm). En revanche, à partir de 1 cm d'épaisseur, on entre dans le domaine de l'exfoliation. Cette couche rigide externe tend à se détacher de la masse des moellons et en est séparée par un matériau poudreux ou sableux, qui peut être libéré par des boursouffures ou des éclatements du feuillet superficiel, ce qui donne un aspect de chancre au moellon. Souvent en surface est présente une couche de suie, qui est indissociable du feuillet superficiel.

La desquamation 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).

Le processus de desquamation peut 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. Ce genre de manifestation est typique des tunnels ferroviaires anciens (combustion de charbons productrice de composés soufrés).



*Figure 1 : moellons desquamés (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)*

**EXFOLIATION****RM-3****Description (aspect visuel du désordre)**

L'exfoliation est une forme d'altération limitée au moellon lui-même. Sous un aspect parfois intact, il y a formation de feuillets d'épaisseur centimétrique, parallèles à l'intrados. La chute naturelle de certains feuillets forme des cavités à la surface de la voûte.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel (si des fragments sont déjà tombés)  
 Examen au contact (feuillets facilement détachables, parfois naturellement instables)  
 Examen sonore (seule l'auscultation au marteau permet de déceler le désordre si l'aspect du moellon est intact)

**Paramètres à relever**

Nature de la roche (moellon) – Étendue du phénomène (très localisé, dispersé, extensif) – Surface – Épaisseur moyenne des feuillets – Profondeur des cavités formées par chute des éléments

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Efflorescences sur les mortiers – Écaillage mécanique

**Origines et causes possibles**

Mauvaise qualité mécanique du moellon – Pose en délit – Gel – Variations de la température et du taux d'humidité – Existence de contraintes au sein du revêtement

**Facteurs aggravants**

Gel – Surcharge de la maçonnerie – Pose en délit – Moellons poreux et/ou gélifs – Briques de qualité moyenne – Joints d'épaisseur irrégulière

**Conséquences, évolutions possibles**

Extensions latérales et/ou en profondeur par coalescence de zones initialement isolées (zones exfoliées se rejoignant)

**Dangers pour les usagers**

Chute de plaques

**Risques pour les structures**

Amincissement du revêtement sur une surface importante

**Surveillance**

Examen visuel  
 Examen au contact  
 Examen sonore

**Remèdes**

Purges périodiques  
 Chemisage en béton si la réduction d'épaisseur de la maçonnerie devient significative

**Observations**

À ne pas confondre avec l'« écaillage mécanique de moellons » (fiche RM-4)  
 Synonyme : délitage, délamination

### 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 et l'intrados est parsemé de cavités plus ou moins étendues et profondes. A l'examen visuel, il n'y a pas de modification pétrographique notable de la structure du feuillet. L'origine de l'exfoliation semble liée à la fois à une altération physico-chimique et à l'effet de contraintes mécaniques, ces causes entrant en jeu, soit successivement, soit concomitamment.

La différence majeure avec l'écaillage d'origine mécanique réside dans le fait que ces feuillets sont très facilement purgeables, même à la main.

L'interprétation globale à l'échelle du tunnel peut être délicate. A 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.

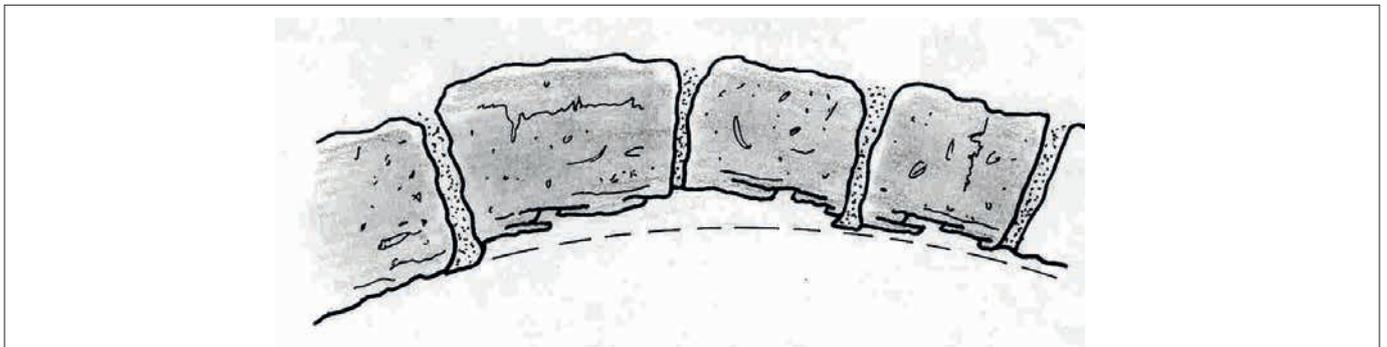


Figure 1 : schéma de l'exfoliation

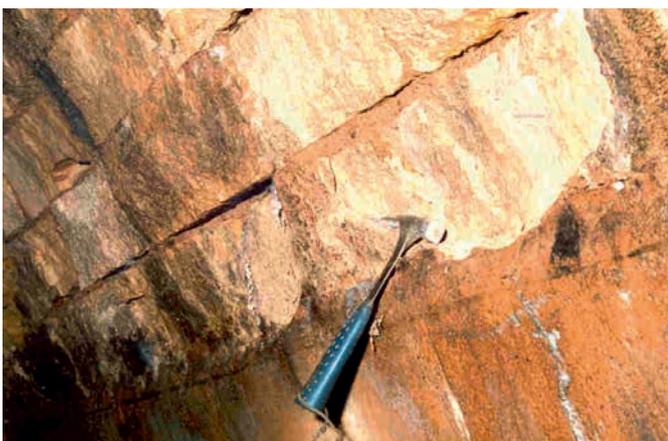


Figure 2 : exfoliations de moellons en calcaire oolithique, fragiles et gélifs



Figure 3 : exfoliation et délitage de moellons en calcaire

**ÉCAILLAGE MÉCANIQUE****RM-4****Description (aspect visuel du désordre)**

Il s'agit d'une 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**

Examen visuel (en lumière rasante)  
Examen sonore (son "chantant" indiquant une mise en contrainte)

**Paramètres à relever**

Extension du phénomène – Localisation (PM de début, PM de fin) – Localisation dans le profil en travers (clé ou rein) – 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 – Déjointoiements – Désordres en chaussée

**Origines et causes possibles**

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

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

**Facteurs aggravants**

Pose en délit – Moellons mal assisés – Déficit de mortier lors de la réalisation des lits horizontaux (moellons en contact)

**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  
Début de mécanisme de rupture du revêtement (hypothèse à envisager dans tous les cas)

**Surveillance**

Examen visuel (écailles tombées)  
Examen sonore (étendue du désordre)  
Mesures des déformations du profil  
Mesures des contraintes dans le revêtement  
Mise sous surveillance renforcée ou haute surveillance suivant les résultats des mesures

Purges fréquentes  
 Pose de grillages de retenue (sécurité des usagers)  
 Réfection par renforcement de la structure, voire reconstruction, suivant le résultat de la surveillance et des mesures

## Observations

À ne pas confondre avec l'« exfoliation » (fiche RM-3)

## 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 contrainte de celui-ci.

La partie superficielle des moellons est décollée et se détache en écailles de plusieurs centimètres 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, 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 ».

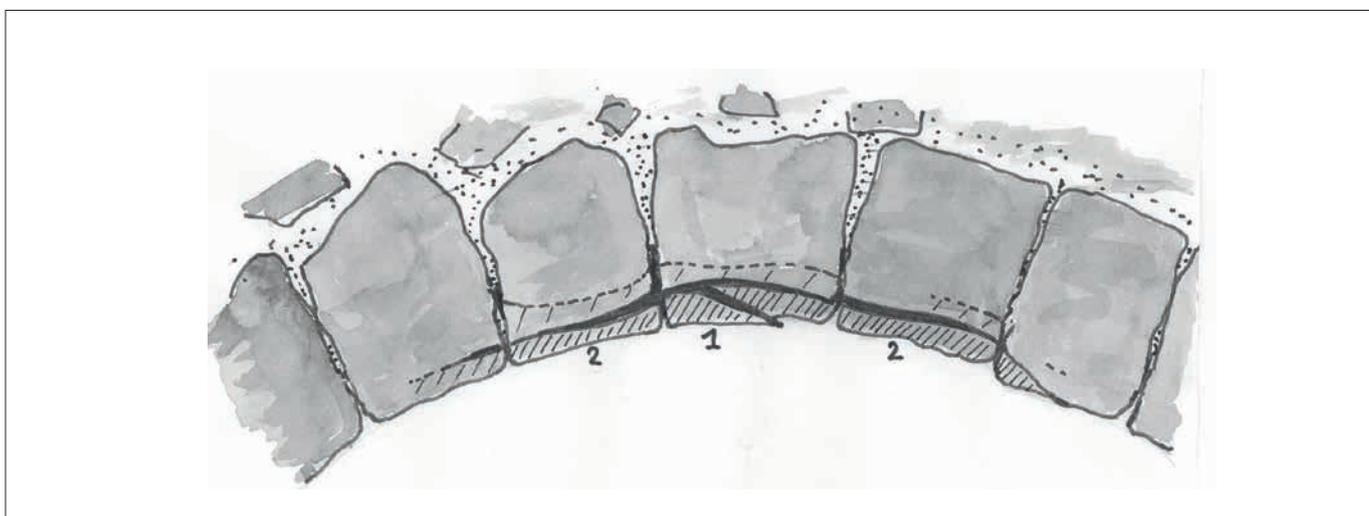


Figure 1 : schéma d'un écaillage de moellons en clé (voûte pincée) (on remarque l'absence de mortier entre les moellons qui sont en contact ; la chute d'une écaille de type 1 déstabilise les écailles de type 2, auparavant coincées ; si la racine de l'écaille tombée sonne encore le creux, cela signifie que de nouvelles écailles sont en formation -pointillés-)



Figure 2 : 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)



Figure 3 : écaillage de moellons en piédroit (l'écaille, décollée de 15 mm, n'est pas détachable à la main ; les moellons supérieurs et inférieurs sont en contact direct sans mortier)

## ALTÉRATION DES MORTIERS – DÉJOINTOIEMENT

RM-5

### Description (aspect visuel du désordre)

Le mortier est meuble et humide, il est parfois réduit à l'état de sable. Les joints se creusent par départ progressif du mortier. Lorsque la maçonnerie est enduite, ce désordre peut se révéler par une humidité plus importante et une fissuration de l'enduit.

### Méthodes d'examen

Examen visuel

Examen au contact (grattage des joints et investigation au marteau ou tout autre outil fin afin de reconnaître la dureté du mortier)

### Paramètres à relever

Consistance – Teinte – Profondeur du déjointolement associé – Surface de revêtement affectée – Localisation (PM de début, PM de fin) – Position dans le profil en travers – Nature des constituants (pierre ou brique, liant)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Efflorescences sur le mortier – Venues d'eau – Mauvaise qualité des moellons – Déformations du profil – Ventres – Moellons descellés – Zones sonnantes le creux

### Origines et causes possibles

Dissolution superficielle du liant – Décohésion par attaque d'eaux agressives - Vieillesse

### Facteurs aggravants

Venues d'eaux importantes, fortement minéralisées (en sulfates en particulier) – Déformations de voûte - Moellons mal assisés – Lits de mortiers irréguliers ou trop épais

### Conséquences, évolutions possibles

Extension latérale et en profondeur en présence d'une forte humidité

Affaiblissement

Déformation

Chute de moellons ou de briques

Ruine de l'ouvrage en absence d'entretien

### Dangers pour les usagers

Chute d'éléments

### Risques pour les structures

Affaiblissement progressif

### Surveillance

Examen visuel (étendue)

Examen au contact (profondeur)

Analyses d'eau et de mortiers

### Remèdes

Drainage

Rejointoiements

Injections de régénération dans le cas de disparition de mortier au cœur de la maçonnerie

Renforcement ou reconstruction

**Observations**

Voir aussi fiches HY-4 (efflorescences) et RB-2 (altération des bétons)

**Informations complémentaires**

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<sup>ème</sup> 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.

Le départ progressif du mortier des joints est un phénomène courant dans les maçonneries de tunnels et est attesté par les nombreux rejointoiements successifs visibles dans certains ouvrages. Le déjointoiement est un signe précurseur de ruine pour les structures s'il n'est pas traité à temps.

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<sub>2</sub> 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.

Cette altération peut se développer à partir de l'intrados par dissolution progressive du liant, provoquant un recul du mortier dans le joint. Le lent recul du mortier s'apparente à l'alvéolisation évoquée pour les pierres gréseuses. Le mortier visible reste compact et dur. L'évolution de ce désordre est à surveiller.

La disparition de mortier peut également concerner l'extrados ou le cœur de la maçonnerie sans laisser apparaître de désordres très visibles à l'intrados. Dans ce cas, seules des reconnaissances mécaniques par sondages permettent de mettre en évidence la perte de liant en extrados. Le défaut ne peut visuellement se constater que par des infiltrations traversant la maçonnerie jusqu'à l'intrados. Elles peuvent être localisées aisément en cas de maçonneries non enduites. Par contre, en cas de revêtement d'enduit, les infiltrations sont diffuses et difficilement localisables. Le remède consiste alors à réaliser des injections de coulis de ciment pour régénérer et surtout coller la structure au terrain.

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.

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



*Figure 1 : décomposition totale d'un mortier amorçant la ruine du piédroit (le facteur aggravant est ici l'absence d'assise)*



*Figure 2 : déjoints 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.)*



## ALTÉRATIONS DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES REVÊTEMENTS – REVÊTEMENTS DE BÉTON (COULÉ EN PLACE OU PRÉFABRIQUÉ)

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Altérations des matériaux constitutifs des revêtements – Revêtements de béton (coulé en place ou préfabriqué)</b>	
Épaufrures	RB-1
Altérations des bétons – Gonflements	RB-2
Écaillage mécanique	RB-3
Éclatements sur armatures	RB-4
Désordres des bétons projetés	RB-5

ÉPAUFRURES	RB-1
<b>Description (aspect visuel du désordre)</b>	
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 (en particulier au niveau des joints de bétonnage).	
<b>Méthodes d'examen</b>	
Examen visuel Examen au contact	
<b>Paramètres à relever</b>	
Position – Dimensions de l'épaufrure par rapport à la structure affectée	
<b>Désordres ou défauts associés à rechercher</b>	
Fissures – Signes d'altération – Éléments instables encore en place autour de la partie disparue (écailles) – Traces de frottements ou de chocs	
<b>Origines et causes possibles</b>	
Chocs accidentels en service ou blessures de chantier (lors du décoffrage, ou de la manutention pour des éléments préfabriqués)	
<b>Facteurs aggravants</b>	
Altérations des matériaux (gel) – Venues d'eau – Mise à nu des armatures	
<b>Conséquences, évolutions possibles</b>	
Extension du désordre et affaiblissement de la structure (si la cause est l'altération des matériaux) Instabilité de la structure affectée (si la cause est accidentelle et la structure légère) Corrosion des armatures en acier (bétons armés)	
<b>Dangers pour les usagers</b>	
Nul sauf si la structure a été fragilisée	
<b>Risques pour les structures</b>	
Nul à conséquent (par affaiblissement de la résistance d'éléments minces en béton)	
<b>Surveillance</b>	
Examen visuel Actions de surveillance continue plus fréquentes (noter la répétition des chocs aux mêmes endroits)	
<b>Remèdes</b>	
Aucune action particulière si la structure n'est pas dangereusement affectée. Les éléments résiduels doivent être purgés.	
<b>Observations</b>	
Ne pas confondre avec les « éclatements sur armatures » (fiche RB-4), bien qu'il y ait parfois convergence d'aspect. La cause et l'évolution sont différentes.	

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'épaufrure 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 armatures ont été mises à nu (passivation des aciers et ragréage).



Figure 1 : élément préfabriqué mince épaufré par un choc (traces de frottements)

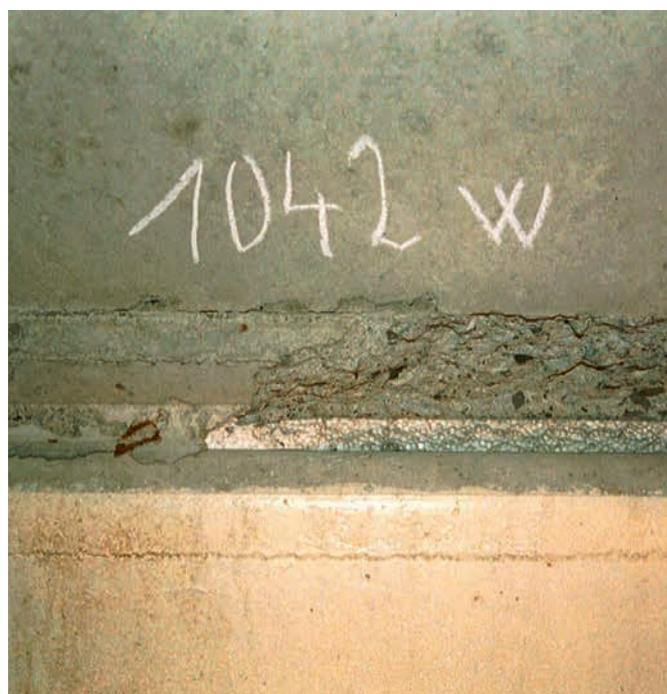


Figure 2 : épaufrure à la base de l'appui d'une dalle de ventilation, survenue probablement lors du décoffrage ; à gauche, subsiste une écaille non encore tombée.

**ALTÉRATIONS DES BÉTONS – GONFLEMENTS****RB-2****Description (aspect visuel du désordre)**

À un stade précoce, il s'agit de dépôts d'exsudats calcaires résultant d'une dissolution interne.

À un stade ultime, des poches de consistance plus ou moins meubles sont présentes, pouvant se localiser au niveau des reprises de bétonnage ou apparaissant en position aléatoire au sein de l'anneau. Elles sont parfois présentes sous une pellicule de laitance encore intacte.

Le gonflement se traduit par une fissuration en macrofaïençage.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel

Auscultation au marteau (cohésion du matériau)

**Paramètres à relever**

Position dans le profil (systématique ou aléatoire) – Surface et profondeur des poches – Consistance et teinte – Stabilité

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Venues d'eau continues – Forte fissuration – Signes d'attaques sulfatiques (efflorescences)

**Origines et causes possibles**

Dissolution du liant (action du CO<sub>2</sub>, des sulfates, des chlorures) puis lessivage – Formation de composés expansifs (ettringite) – Alkali-réaction – Action du gel

**Facteurs aggravants**

Bétonnage par temps de gel – Sous-dosage en ciment – Gel – Circulations d'eau – Compression excessive du revêtement

**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**

Affaiblissement de la structure

Ruine locale ou généralisée

**Surveillance**

Examen visuel

Auscultation au marteau (consistance, profondeur)

Analyses des eaux et du béton

**Remèdes**

Drainage

Régénération par injections

Ragréage après purge

Reconstitution (béton projeté et treillis soudé)

Voir aussi fiches HY-4 (efflorescences) et RM-5 (altération des mortiers)

#### Altération du béton

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.

Le béton est altéré lorsque les granulats se déchaussent progressivement du liant qui apparaît comme meuble, sableux, ou quasiment absent. Ce terme un peu général recouvre un état de destruction du béton, local ou généralisé, qui peut avoir des origines différentes. 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.

#### *Dissolution*

La solution interstitielle du béton ayant un pH proche de 13, elle est donc chimiquement instable vis-à-vis de toute agression extérieure qui sera forcément plus acide. 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. En tunnels, les principaux agresseurs sont le dioxyde de carbone de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>), les eaux douces ou peu minéralisées, les eaux sulfatées (séléniteuses), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dégagé par les gaz d'échappement, accessoirement les chlorures.

L'eau chargée en gaz carbonique dissout en priorité la portlandite 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. C'est une phase de construction qui va 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<sub>2</sub>.

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.

#### *Lessivage du liant après dissolution*

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<sub>2</sub> 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.

#### *Sous-dosage en ciment*

Le sous-dosage en ciment peut expliquer l'absence de liant observé sur certains bétons, surtout lorsqu'ils datent d'époques où les spécifications et les contrôles étaient moins stricts qu'aujourd'hui. Le délavage peut de surcroît s'être exercé particulièrement dans ces zones plus perméables.

#### *Béton mis en œuvre par temps de gel*

Lorsque le béton est soumis au gel au cours de sa prise, ses résistances mécaniques sont amoindries. Sa structure est plus poreuse et il sera beaucoup plus vulnérable aux agents agressifs extérieurs.

#### Gonflement

Le gonflement se traduit à l'intrados par une fissuration en macrofaiçonnage selon un maillage décimétrique souvent souligné par des traces d'humidité et des exsudations de gels. L'évolution peut conduire à la désagrégation et à la chute du revêtement. Le phénomène correspond à une augmentation de volume qui se produit dans toute la masse du béton. On peut distinguer trois causes principales.

#### *Formation de composés expansifs*

L'ettringite – appelée aussi sel de Candlot – se forme, soit lorsqu'il y a un excès de gypse, de chaux libre ou de magnésie libre dans les ciments, soit lorsque des eaux sulfatées viennent attaquer un ciment riche en aluminat tricalcique. La chaux du liant est dissoute, donnant lieu à la formation de sulfate de calcium, immédiatement remis en solution (il y a alors entrainement de matière) et de gypse (secondaire) expansif. Celui-ci réagit alors avec l'aluminat tricalcique du ciment pour former de l'ettringite ou de la thaumasite. Ces composés fortement expansifs et non-liants sont les principaux responsables de la désagrégation de certains bétons anciens, par destruction progressive des liaisons inter-granulaires. S'ils 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.

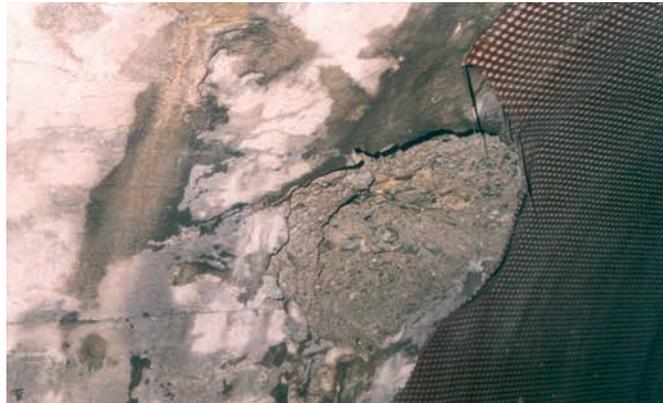
Pour éviter la réaction du béton aux eaux sulfatées, on emploie des ciments spéciaux à faible teneur en aluminat tricalcique ou riches en laitier (ou en mélange de laitier et de cendres volantes).

#### *Alcali- réaction*

L'alcali-réaction peut être assimilée à une réaction chimique hétérogène solide-liquide entre les granulats et la solution interstitielle alcaline du liant. La forme la plus fréquente est la réaction alcali-silice qui se produit avec des roches contenant de la silice amorphe (opale, calcédoine) ou microcristalline. Il y a formation d'un gel alcali-siliceux, causant une expansion du béton et sa fissuration, voire son affaiblissement mécanique.

#### *Gel*

L'effet du gel peut intervenir comme facteur aggravant d'une altération préalable ayant favorisé l'accès de l'eau au cœur de la masse du béton. Cette cause peut être suspectée principalement à proximité des têtes de tunnel.



*Figure 1 : béton altéré par dissolution et lessivage, puis soumis au gel*

## ÉCAILLAGE MÉCANIQUE

RB-3

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit d'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

Examen visuel en lumière rasante  
Examen sonore (auscultation au marteau)

### Paramètres à relever

Dimensions des écailles (surface et épaisseur présumées) – Position dans le profil en travers (clé ou rein) – Ouverture et désaffleurement des fissures

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration de voûte anormale (réseaux orientés, décalage de lèvres, ...) – Profil déformé – Zones proches d'aspect sain mais sonnante creux

### Origines et causes possibles

Excès de compression dans le revêtement, dépassant la résistance mécanique du béton (des contraintes de traction perpendiculaires au parement se développent et créent les écailles)

### Facteurs aggravants

Voûte surbaissée – Béton hétérogène ou de mauvaise qualité – Mauvais dimensionnement de l'ouvrage

### Conséquences, évolutions possibles

Extension du risque (désordre à la fois extensif et intensif) – Phénomène critique (même s'il n'est pas associé à une déformation de la voûte dans les cas courants)

### Dangers pour les usagers

Chute de plaques de béton fragilisées

### Risques pour les structures

Rupture plus ou moins complète du revêtement

### Surveillance

Examen visuel (écailles tombées, extension du désordre, ouvertures des fissures)  
Examen sonore (extension du désordre)  
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

Pour la sécurité des usagers : purges fréquentes – pose de grillages de retenue  
Réfection par renforcement de la structure, voire reconstruction (suivant le résultat de la surveillance et des mesures)

## Observations

À ne pas confondre avec les « éclatements de béton sur armature » (fiche RB-4)

## 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'écaillés. Le revêtement se rompt rapidement sous l'action de contraintes excessives à l'intrados. Ces désordres sont localisés 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 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.

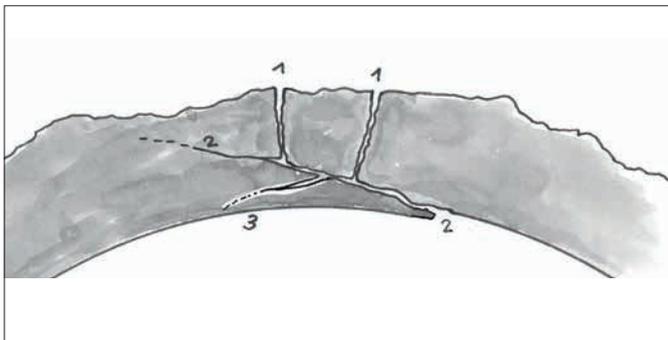


Figure 1 : schéma du mécanisme d'écaillage du béton en clé de voûte ; l'intrados est mis en compression et des fissures suivantes se forment : fissures de traction à l'extrados (1), fissure de cisaillement à l'intrados (2), la fissure est ouverte car le matériel broyé foisonne et tend à repousser l'écaillage en formation ; la racine de l'écaillage (3) cède rapidement et celle-ci devient instable ; toute la sous-face sonne creux



Figure 2 : début de cisaillement du béton en clé (la fissure de cisaillement est ici nettement exprimée ; la lèvre est fragile.)

## ÉCLATEMENTS SUR ARMATURES

RB-4

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit d'écailles, tombées ou décollées mais toujours en place, faisant apparaître des armatures oxydées (chute du béton d'enrobage ou de la laitance).

### Méthodes d'examen

Examen visuel

Examen sonore (auscultation au marteau, particulièrement si le spectre des armatures est très affirmé)

### Paramètres à relever

Dimensions et épaisseur des écailles – Extension des zones d'armatures visibles – Degré de corrosion des armatures

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Humidité – Altérations du béton – Présence de fissures fines, parallèles et nombreuses – Présence de zones sonnantes creux

### Origines et causes possibles

Enrobage trop faible (mauvais positionnement des fers ou déplacement pendant le bétonnage) – Présence d'eau – Absence d'étanchéité en extradoss – Dépassivation des armatures par la carbonatation du béton et corrosion

### Facteurs aggravants

Présence d'eau – Absence d'étanchéité en extradoss – Sels de déverglaçage (en particulier aux têtes) – Atmosphère chargée de gaz d'échappement

### Conséquences, évolutions possibles

Extension des éclatements (progression de l'oxydation le long des armatures)

### Dangers pour les usagers

Chutes de plaques ou d'écailles (si le désordre est situé au-dessus des voies de circulation)

### Risques pour les structures

Diminution de la résistance du béton dans le cas d'éléments (profondeur du désordre limitée à l'épaisseur du recouvrement des armatures)

### Surveillance

Examen visuel

Examen sonore

### Remèdes

Purges, piquages

Dégagement complet et passivation des armatures

Ragréages

### Observations

### Informations complémentaires

Ce désordre est rarement rencontré dans les tunnels récents puisque ceux-ci ne sont revêtus de béton armé qu'à proximité des têtes ou dans des zones de profil renforcé. Il se résume le plus souvent à un éclatement du béton au droit d'une armature trop proche de l'intrados (moins de 1 cm). Il est déclenché par le processus de carbonatation du béton qui s'opère à partir de l'intrados. La passivité des armatures métalliques les plus proches de l'intrados disparaît ; l'acier va alors se corroder et déclencher des éclatements du béton par foisonnement du métal oxydé.

Quelques tunnels (entre les années 50 et 70) ont pu être réalisés entièrement en béton armé. En l'absence d'une étanchéité totale en extrados, le désordre apparaît surtout dans les zones humides, poreuses, où la carbonatation a pénétré profondément. 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'usager, plutôt que pour la structure (ce désordre est rarement généralisé à l'ensemble du tunnel). La 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 visible (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 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.

La figure 3 illustre l'aspect d'un spectre d'armatures à l'intrados d'un anneau en piédroits. Des carottages de contrôle ont confirmé que le spectre est d'autant plus marqué que les armatures sont proches de l'intrados et qu'il disparaît quand les armatures sont à plus de 5 cm de profondeur. De fines fissures de retrait peuvent souligner les lignes du spectre. Une armature tangente provoque à court terme un éclatement de béton très localisé.

Les causes, à l'origine du faible recouvrement des armatures, sont multiples : mauvaise mise en place lors du ferrailage, mise en résonance de la nappe d'armature pendant la vibration interne ou externe, légères ségrégations entre armatures et coffrage par effets de paroi (proximité du coffrage et des armatures), pellicule de graisse sur les armatures.

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



Figure 1 : écaille de 2 à 3 cm d'épaisseur suite à la corrosion d'une armature (béton de 1963)



Figure 2 : éclatements dans un béton récent



Figure 3 : spectre des armatures en piedroit d'anneau



Figure 4 : éclatement du béton dû à la corrosion et au faible enrobage des armatures

**DÉSORDRES DES BÉTONS PROJETÉS****RB-5****Description (aspect visuel du désordre)**

Les bétons projetés peuvent présenter plusieurs désordres :

- une fissuration particulière de type faïençage,
- des défauts d'enrobage du treillis soudé, parfois localement apparent,
- une épaisseur insuffisante, surtout sur le rocher (présence de « pointes »),
- des éclatements superficiels du béton sur les treillis soudés ou des têtes de boulon oxydées,
- des défauts d'adhérence au support ou support rocheux altéré (zones sonnant creux),
- des ruptures et chutes partielles de béton.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel

Examen sonore (zones sonnant creux)

Auscultation au marteau (adhérence)

**Paramètres à relever**

Zones sonnant creux (extension et position) – Adhérence du béton sur le support (en particulier aux limites des panneaux de béton projeté) – Présence d'instabilités localisées – Épaisseur du béton projeté (mesure ou estimation) – Enrobage des armatures (mesure ou estimation)

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Venues d'eau – Fissures de grande extension – Fissures ouvertes

**Origines et causes possibles**

Défauts de mise en œuvre (projection sur un support mal nettoyé ou mal purgé, mauvais dosage des constituants du béton, fortes variations d'épaisseur) – Mauvaise qualité du support – Venues d'eau – Drainage défaillant – Gonflement du terrain (en particulier pour les bétons projetés non armés)

**Facteurs aggravants**

Terrains gonflants en présence d'eau – Panneaux de béton projeté sans treillis soudés ou fibres (réparations anciennes)

**Conséquences, évolutions possibles**

Instabilités locales (plaques) – Altérations – Désagrégation du béton

**Dangers pour les usagers**

Chutes d'éléments

**Risques pour les structures**

Faibles à forts suivant l'intensité des désordres et les surfaces concernées

**Surveillance**

Examen visuel (apparition de fissures)

Examen sonore

Auscultation au marteau (adhérence)

## Remèdes

Mise en sécurité par purges des parties instables  
Reconstitution du revêtement

## Observations

Voir aussi fiche ED-8 (complexes isolants étanches)

## Informations complémentaires

Le béton projeté est souvent 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) et s'applique à tous les mortiers ou bétons mis en place par projection.

Chronologiquement, on trouve les gunites, les bétons projetés (non armés ou armés avec des treillis soudés), les bétons projetés fibrés et les coques auto-stables.

### *Les gunites*

Ce sont des mortiers projetés sous forme de couche mince (1 à 3 cm en moyenne), rarement armés, 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 renforcements, ils sont plus épais (5 à 15 cm) et, le plus souvent, armés de treillis soudés épinglés au rocher. Leur tenue dans le temps est généralement très bonne.

L'auscultation des bétons projetés directement sur la roche fait toujours apparaître de nombreuses zones sonnantes creux au marteau. Ce n'est pas toujours le béton seul qui sonne creux mais parfois l'ensemble constitué du béton et de la roche localement décollée. Ce type de revêtement mince étant souvent mis en place sur un terrain de cohésion variable, il s'ensuit des défauts de compacité globale inévitables, même si l'adhérence à la roche est bonne.

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 et qui conduiront à la rupture de la structure.

### *Les bétons projetés fibrés*

Ces bétons contiennent des fibres métalliques ou macro-synthétiques. Elles sont parfois employées en combinaison avec un treillis soudé. La fissuration est moins développée et la rupture plus progressive.

### *Les coques auto-stables*

Elles sont réalisées en béton projeté armé avec une étanchéité totale. Aucun désordre spécifique, lié à la technique de fabrication, n'est apparu pour l'instant.

Un dispositif d'étanchéité étant mis en place avant la projection, une coque de béton mince sonnera le creux dans sa totalité sans que cela constitue un désordre.



Figure 1 : enrobage insuffisant du treillis soudé (malfaçon)



Figure 2 : faïençage d'un béton projeté sur rocher humide (retrait d'un béton non fibré)

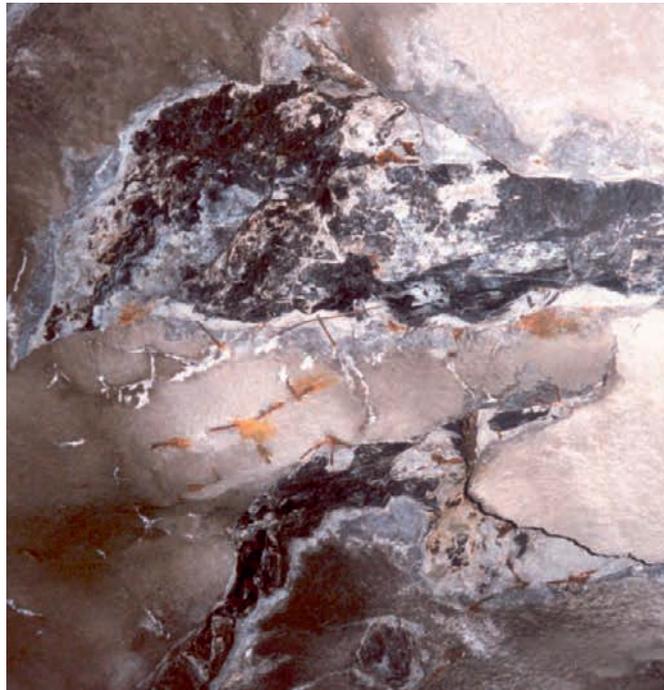


Figure 3 : béton projeté tombé en calotte (conjugaison d'une projection mal conduite, sur un terrain schisteux, humide et instable, soumis au gel prolongé)

## DÉSORDRES DES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ, DE DRAINAGE ET D'ASSAINISSEMENT

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des dispositifs d'étanchéité, de drainage et d'assainissement</b>	
Désordres des drains d'intrados	ED-1
Désordres des drains et caniveaux d'extrados	ED-2
Désordres des drains de chaussée	ED-3
Désordres des feuilles d'étanchéité en extrados	ED-4
Désordres des tôles parapluies	ED-5
Désordres des cuvelages d'étanchéité	ED-6
Désordres des enduits minces	ED-7
Désordres des complexes isolants étanches	ED-8
Désordres dus aux joints hydrogonflants	ED-9

**DÉSORDRES DES DRAINS D'INTRADOS****ED-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Il s'agit de désordres de différentes natures survenant sur des dispositifs de drainage mis en place sur les revêtements de tunnels conçus, à l'origine, sans étanchéité totale en extradossés ou dont l'étanchéité extradossée est défaillante. Il peut s'agir de blessures, décollements, arrachements, colmatages ou fuites.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel  
Vidéo-endoscopie

**Paramètres à relever**

Position des exutoires des fuites – Linéaire humide des joints – Éventuel engorgement par de la calcite ou des fines (visible à la faveur d'un décollement) – Hauteur d'arrachement (souvent suite à un choc par un poids-lourd)  
Mesure de débit si un projet de réparation est envisagé

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Altérations du revêtement – Humidité anormale

**Origines et causes possibles**

Mauvaise réalisation – Terrain ou revêtement altéré amenant des fines – Eau incrustante – Choc par un véhicule  
Causes accidentelles

**Facteurs aggravants**

Accidents – Drain sous-dimensionné – Périodes de gel prononcé

**Conséquences, évolutions possibles**

Perte d'efficacité du drainage – Augmentation des poussées hydrauliques sur la structure – Déplacement des venues d'eau ou apparition d'autres arrivées d'eau

**Dangers pour les usagers**

Eau ou verglas sur la chaussée – Stalactites de glaces au droit des voies de circulation

**Risques pour les structures**

Altérations des matériaux dues à la présence de l'eau (éclatement des matériaux sous l'effet gel-dégel, corrosion des éléments métalliques et des équipements)

**Surveillance**

Examen visuel

**Remèdes**

Réfection complète des drains

**Observations**

Analyse d'eau si un projet de réparation est envisagé

Ces dispositifs, mis en place à l'intrados, concernent uniquement les tunnels conçus sans étanchéité totale en extrados 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. On peut citer :

- les barbacanes ou les forages drainants (tubés ou non) en piédroits,
- les pontages collés sur les joints de bétonnage ou sur des fissures,
- les saignées dans le revêtement recevant un profilé drainant amovible ou non.

Les eaux recueillies par ces dispositifs doivent être collectées.

Les drains se dégradent rapidement en conditions sévères par des éclatements dus au gel, ou par colmatage rapide par des fines amenées par les eaux.

Les pontages collés présentent assez souvent des déchirures ou des défauts de collage amenant des fuites. Les profilés amovibles (de type PRT) ne sont réellement efficaces que si les saignées sciées sont rectilignes et ont des lèvres très régulières. Cependant, alors que la pose est correctement réalisée, il arrive que la porosité du béton mal vibré laisse passer l'humidité aux abords du joint.

Les pontages collés et les saignées, même s'ils recueillent la plus grande partie de l'eau, ne constituent 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 et occasionner des fuites latérales supplémentaires. Par ailleurs, dans les tunnels ainsi équipés, les frottements des poids-lourds au niveau des reins peuvent provoquer l'arrachement ou le cisaillement des pontages ou des joints amovibles, y compris ceux protégés par des profilés métalliques.

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 peut être blessé ou décollé.

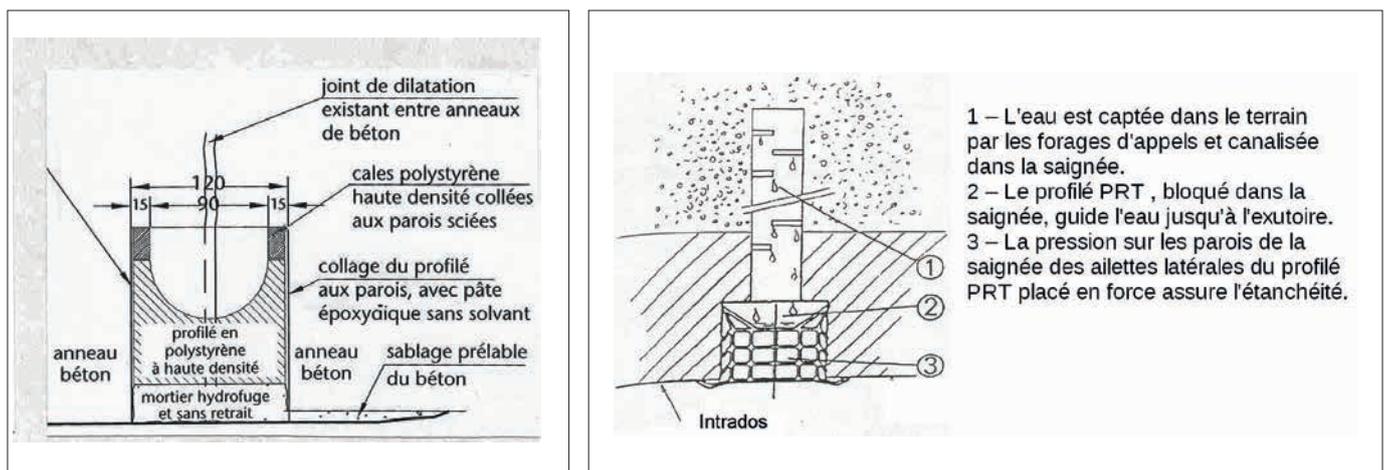


Figure 1 : deux types de captages linéaires d'intrados



Figure 2 : pontage décollé (la base du captage est détruite par le gel et engorgée)



Figure 3 : pontage et joint amovible (ici joint PRT et pontage Hypalon) détruit par des frottements de poids lourds



Figure 4 : drain d'intrados en acier zingué, corrodé et fuyant

## DÉSORDRES DES DRAINS ET CANIVEAUX D'EXTRADOS

ED-2

### Description (aspect visuel du désordre)

Ces désordres peuvent prendre plusieurs formes :

- engorgement des drains et caniveaux par des concrétions de calcite ou par des fines (visibles au droit des regards de visite),
- obturation des canalisations par des corps étrangers,
- écrasement des drains circulaires (visible uniquement par vidéo-endoscopie).

### Méthodes d'examen

Examen visuel (observation des exutoires et de leur état d'engorgement, état des regards de visite)  
Vidéo-endoscopie

### Paramètres à relever

Nature du remplissage visible (concrétions de calcite dure, dépôts, débris divers) – Quantité – Réduction de la section du drain – Répartition dans le système de drainage

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Humidité locale anormale – Venues d'eau

### Origines et causes possibles

Eau naturellement chargée en carbonates (massifs calcaires) – Eau s'étant enrichie en carbonates par lessivage des bétons de soutènement (tunnels récents) – Malfaçons ou négligences à la réalisation

### Facteurs aggravants

Gel – Défaut d'entretien

### Conséquences, évolutions possibles

Perte de la fonctionnalité du drainage – Mises en charge hydraulique locale – Humidité apparente en partie circulée

### Dangers pour les usagers

Chaussée humide – Verglas

### Risques pour les structures

Aucun

### Surveillance

Examens visuels périodiques (aux débouchés)

### Remèdes

Curage à l'eau sous pression  
Curage renforcé à la fraise  
Emploi de pastille « anti-calcite » de dissolution de la calcite (à mettre en place dans les regards)  
Réalisation d'un nouveau drain contournant la zone obturée

### Observations

Voir aussi fiche HY-2 (concrétions)

### Informations complémentaires

Ce type de drain concerne les tunnels munis d'une étanchéité en extrados. Il est destiné à capter l'eau détournée par la feuille d'étanchéité et à la ramener dans un collecteur. Il est incorporé dans les banquettes de la voûte, à un niveau inférieur à la chaussée finie (de l'ordre de 1 m). Il n'est accessible, pour curage, qu'au droit des regards de visite souvent situés dans des niches aménagées à cet effet dans les piédroits ; un exutoire vers le collecteur principal existe dans chacun d'eux.

Suivant l'âge du tunnel, il peut être constitué par des éléments 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 car il ne peut être réalisé que par vidéo-endoscopie.

Les défauts et désordres courants suivants sont souvent mis en évidence par les vidéo-endoscopies :

- concrétions et dépôts ;
- malfaçons de chantier ou négligences :
  - pour les drains PVC : écrasement de la banquette lors du bétonnage, dispositifs utilisant des drains « agricoles » trop fragiles ;
  - pour les 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 dalots de couverture, coffrages oubliés obturant totalement le drain.

Au total, les malfaçons représentent 50 % des dysfonctionnements.

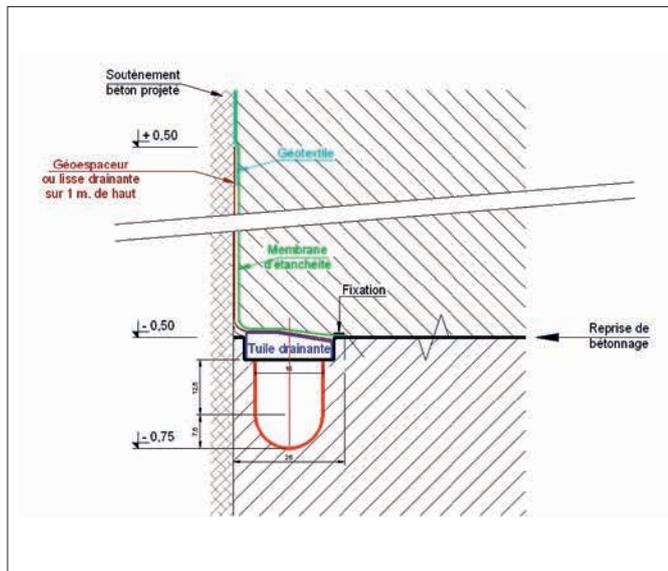


Figure 1 : coupe d'un caniveau drainant en base de feuille d'étanchéité

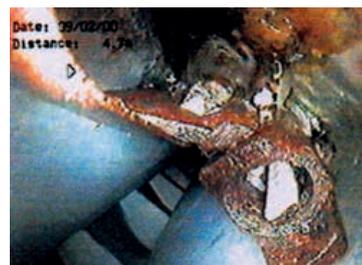


Figure 2 : exemples de caniveaux engorgés de débris de chantier (vidéo-endoscopie)

## DÉSORDRES DES DRAINS DE CHAUSSÉE

ED-3

### Description (aspect visuel du désordre)

Les drains de chaussée peuvent être engorgés, écrasés ou cassés ; ces désordres ne sont visibles que par endoscopie (quand elle est possible) et se traduisent par une humidité en chaussée, non liée à des venues d'eau de la voûte, et par des infiltrations ou des stagnations d'eau dans d'autres ouvrages (puisards, collecteurs, caniveaux à fente longitudinale).

Les drains de chaussée ne sont pas conçus pour être tous accessibles et curables.

### Méthodes d'examen

Examen visuel (à partir des exutoires, s'ils sont accessibles, et des regards de visite)

Vidéo-endoscopie

### Paramètres à relever

Nature du remplissage (concrétions de calcite dure, dépôts divers) – Quantité (réduction de la section du drain) – Fissuration de la chaussée (chaussées rigides) – Localisation et surface de chaussée affectée par l'humidité – Localisation et nature des exutoires (ponctuels ou diffus, écoulement sous pression)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Désordres affectant la chaussée (fissures, bombements, tassements...)

### Origines et causes possibles

Charge minérale des eaux, soit naturelle, soit acquise à la traversée des bétons poreux enrobant les drains – Malfaçons – Mauvaise conception – Déformation de l'ouvrage ou du terrain encaissant

### Facteurs aggravants

Terrain encaissant évolutif – Défauts d'entretien

### Conséquences, évolutions possibles

Perte de la fonctionnalité du drain – Mises en charge hydraulique locale – Humidité apparente – Dégradation des couches de chaussée par remontées d'eau

### Dangers pour les usagers

Chaussée localement humide ou mouillée (avec risque de verglas)

### Risques pour les structures

Aucun

### Surveillance

Examens visuels périodiques (aux débouchés)

Relevé des résurgences et de leurs déplacements éventuels

### Remèdes

Hydrocurage haute pression (quand les drains sont accessibles)

Emploi de pastille de dissolution de calcite (à mettre en place dans les regards, s'ils existent)

Réalisation d'un nouveau drain contournant la zone obturée

## Observations

Voir aussi fiche HY-2 (concrétions)

## Informations complémentaires

Les drains de chaussée, longitudinaux ou en épis, sont mis en place dans la fondation de la chaussée (entre 0,5 et 1 m sous la chaussée finie) et enrobés de bétons drainants. Ils sont destinés à capter les eaux basses et les renvoyer à un collecteur. Ils ne sont visibles qu'à leurs exutoires ou dans des regards de visite. Ils n'ont pas toujours été conçus pour être curés périodiquement.

Ce type de drain capte une partie des eaux qui percolent au travers des graves-ciment (drainantes ou non) présentes 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, souvent de faible diamètre (100 à 150 mm), peuvent se colmater très rapidement.

Avant toute inspection, les différents drains et les collecteurs doivent être exactement localisés à l'aide des plans d'exécution.

Au cours de la visite dans l'ouvrage, il faut s'astreindre, avec l'accord et l'aide de l'exploitant, à soulever tous les tampons ou grilles pour observer les exutoires et 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.

Les concrétions calcaires dans les drains de chaussée représentent 75 % des dysfonctionnements ; le reste est dû à des dépôts divers.

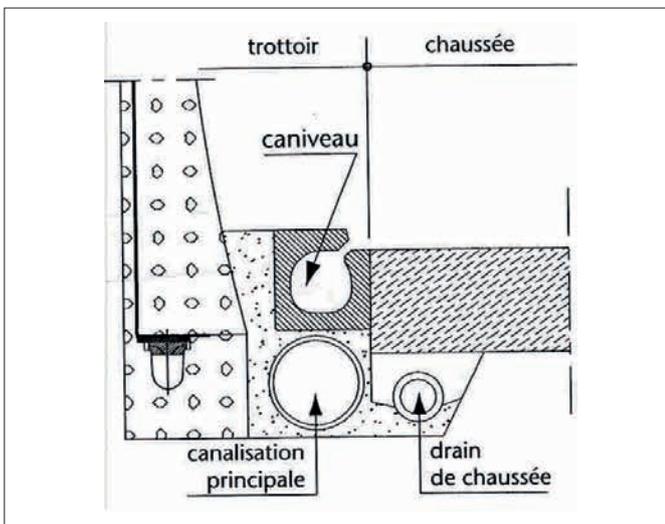


Figure 1 : caniveau d'extrados, drain de chaussée, collecteur et caniveau à fente



Figure 2 : vidéo-endoscopie d'un drain en PVC bouché par de la calcite

## DÉSORDRES DES FEUILLES D'ÉTANCHÉITÉ EN EXTRADOS

ED-4

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit de blessures (déplacements, déchirures ou plis) de la feuille d'étanchéité ; il existe donc une discontinuité (assimilable à un vide) au sein du béton de l'anneau. Lorsque le désordre est visible, la feuille apparaît alors au décoffrage à l'intrados de l'anneau sur une surface variable ; dans le cas contraire, une zone de béton sonnante creux peut être l'indice d'un déplacement, d'une déchirure ou d'un pli de la feuille.

### Méthodes d'examen

Examen visuel  
Examen sonore (auscultation au marteau systématique de l'ensemble de l'intrados, même si aucun défaut n'est visible)  
Auscultation radar

### Paramètres à relever

Localisation – 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 et causes possibles

Mauvaise mise en œuvre (feuille trop ou pas assez tendue entre ses fixations, amorce de déchirure par des éléments du soutènement ou des armatures)

### Facteurs aggravants

Venues d'eau – Terrain encaissant évolutif

### Conséquences, évolutions possibles

Comportement anormal du revêtement à long terme (présence d'une discontinuité)

### Dangers pour les usagers

Aucun

### Risques pour les structures

Vieillesse accélérée – Désordres supplémentaires si l'eau est présente très près de l'intrados (gel prolongé)

### Surveillance

Examen visuel (apparition de venues d'eau en plein anneau de béton)  
Examen sonore

### Remèdes

Réparation faite pendant le chantier de construction (piquage, reconstitution de l'étanchéité, ragréage) si la feuille est apparente au décoffrage  
Aucune réparation tant que le désordre n'est pas visible et que la structure ne présente pas de désordres ou de défauts associés

## Observations

Voir aussi fiche MO-2 (vides dans les revêtements à proximité de l'intrados)

## Informations complémentaires

Les feuilles d'étanchéité en PVC thermo-soudées et spitées au support sont destinées, dans les tunnels modernes, à éviter aux eaux du massif de venir au contact du revêtement principal. Cependant, des désordres comme des venues d'eau, mais aussi des zones sonnantes creux, sont apparus au sein des anneaux de béton coffré étanche. 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 creux très localement ;
- 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 alors derrière la feuille déchirée, la rabattant parfois contre le coffrage ou à proximité immédiate de celui-ci ; on aura dans ce cas une zone sonnante creux plus étendue ;
- un élément métallique du soutènement, non recépé, amorçant la déchirure de la feuille.

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.

Une fois le bétonnage réalisé, la feuille échappe à tout contrôle courant, sauf si elle se trouve ramenée à l'intrados et visible au décoffrage ou si l'épaisseur de béton devant la feuille est inférieure à une dizaine de centimètres (son creux au marteau).



Figure 1 : repli de feuille (zone sonnante creux localement)

## DÉSORDRES DES TÔLES PARAPLUIE

ED-5

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit :

- soit de déformations ou de déchirures dues à des chocs,
- soit des perforations par oxydation,
- soit des ruptures de fixations sur les lisses ou des ruptures d'ancrage de lisses par corrosion

### Méthodes d'examen

Examen visuel (observation de l'espace entre les tôles et le revêtement ou le rocher)  
Auscultation (vérification à la main du battement éventuel des éléments de tôles)

### Paramètres à relever

Localisation – Surface – Degré d'oxydation des ancrages et des lisses – 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 l'extrados des tôles (volumes à estimer) – Altération du revêtement du tunnel – Venues d'eau

### Origines et causes possibles

Altérations et corrosions diverses – Choc – Chute de blocs rocheux ou d'éléments du revêtement sur les tôles – Venues d'eau

### Facteurs aggravants

Faible section transversale de l'ouvrage (favorisant les chocs de poids-lourds) – Ancienneté des dispositifs d'attache

### Conséquences, évolutions possibles

Perte d'accrochage des tôles conduisant à leur battement voire à leur chute  
Venues d'eau sur la chaussée

### Dangers pour les usagers

Domages aux véhicules de grande taille  
Risque consécutif à des chutes d'éléments

### Risques pour les structures

Ruine progressive du dispositif

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Remplacement des éléments, des lisses et ancrages

### Observations

### Informations complémentaires

L'appellation générique de tôle parapluie englobe des dispositifs en tôle galvanisée, en fibres-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 de 5 cm au moins.

Ce procédé, déjà ancien, est encore utilisé dans de nombreux tunnels, dans les zones de calotte les plus humides : il permet de supprimer les chutes d'eau sur la chaussée en renvoyant l'eau recueillie sur les côtés.

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 nécessite la dépose d'une ou plusieurs tôles.



Figure 1 : perte d'un élément métallique et rupture des ancrages



Figure 2 : panneaux en fibres-ciment (oxydation importante des lisses de soutien et rupture d'une fixation)

## DÉSORDRES DES CUVELAGES D'ÉTANCHÉITÉ

ED-6

### Description (aspect visuel du désordre)

Sous la pression de l'eau sur le film d'étanchéité, des cloques de décollement peuvent apparaître ; celles-ci peuvent éclater sous l'effet de la pression ou du gel.

D'autre part, après quelques années, les produits employés pour réaliser les cuvelages perdent leur élasticité et deviennent fragiles. Le film étanche se craquelle et des concrétions peuvent se former au droit des blessures.

### Méthodes d'examen

Examen visuel

### Paramètres à relever

Localisation – Surface – Présence d'eau en pression dans les cloques – Adhérence du film sur le support

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Altération du support au droit des blessures du film (gonflement des armatures, fissures) – Venues d'eau

### Origines et causes possibles

Vieillesse du cuvelage – Décollement, mise en pression, éclatement sous l'effet de fortes charges d'eau – Effet du gel

### Facteurs aggravants

Support humide lors de la mise en œuvre du cuvelage – Fissures de grande extension – Fissures ouvertes – Mauvaise qualité du support

### Conséquences, évolutions possibles

Réapparition des venues d'eau et des concrétions

### Dangers pour les usagers

Arrivée d'eau sur les voies de circulation – Chaussées humides

### Risques pour les structures

Altération plus rapide du support, du fait de la saturation permanente en eau à l'arrière du film

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Nettoyage sous pression

Dépose des parties de cuvelage très abîmées

Recherche d'une autre solution d'étanchement, ponctuelle ou globale, suivant l'étendue des désordres et les débits des venues d'eau

### Observations

### Informations complémentaires

La forte humidité de certains tunnels anciens, gênante pour l'exploitation, a conduit à mettre en œuvre des « étanchéités d'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 films subsistent, ils 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 et n'est d'ailleurs plus utilisée.



Figure 1 : dégradation d'un film de résine posé sur maçonnerie



Figure 2 : cloques du film de résine avec eau sous pression



Figure 3 : éclatement d'un cuvelage sous l'effet du gel

## DÉSORDRES DES ENDUITS MINCES

ED-7

### Description (aspect visuel du désordre)

Les désordres des enduits minces se manifestent par :

- des défauts d'adhérence au support (zones sonnant creux),
- une fissuration particulière de type faïençage,
- des cloques et/ou chutes de parties d'enduit.

### Méthodes d'examen

Examen visuel

Examen sonore par auscultation légère au marteau ou manuelle

### Paramètres à relever

Localisation et surfaces (zones sonnant creux, zones cloquées, zones sans enduit) – Épaisseur moyenne de l'enduit – Présence d'armatures – Adhérence de l'enduit – Présence d'instabilités localisées sur les faïençages

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau ponctuelles – Fissures de grande extension – Fissures ouvertes – Efflorescences blanches sur/sous l'enduit

### Origines et causes possibles

Vieillessement de l'enduit – Différence d'inertie thermique entre le support et l'enduit (généralement plus riche en ciment que le support)

### Facteurs aggravants

Présence d'eau – Gel – Mauvaise qualité du support et/ou de l'enduit

### Conséquences, évolutions possibles

Extension des décollements – Fissuration de l'enduit sous son propre poids – Chute de parties d'enduit

### Dangers pour les usagers

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

### Risques pour les structures

Risques minimales pour le support

### Surveillance

Examen visuel

Examen sonore

### Remèdes

Purges préventives (en cas de danger)

Réfection de la zone dégradée ou mise en œuvre d'un autre procédé

### 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 entraîner une partie du support altéré. Leur auscultation rapprochée demande donc certaines précautions.



Figure 1 : enduit sur béton ancien, fissuré et décollé

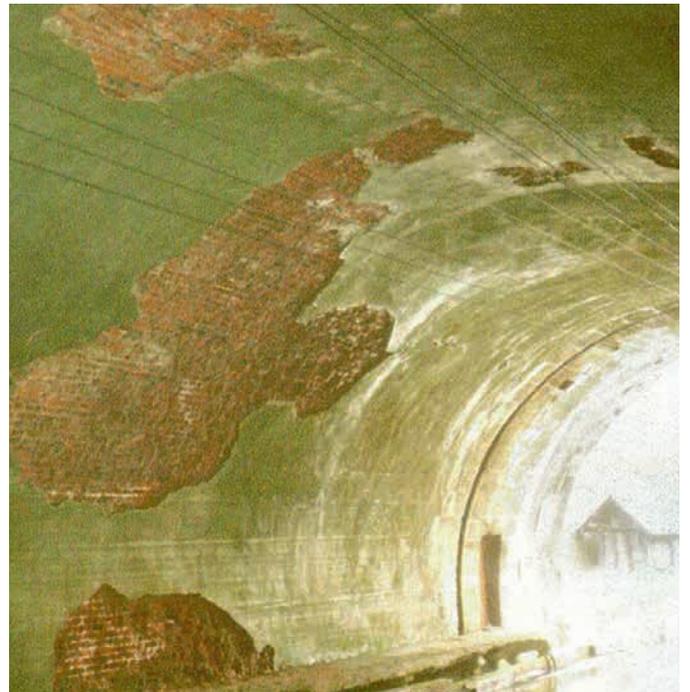


Figure 2 : enduit tombé (voûte en briques dans un tunnel-canal)

## DÉSORDRES DES COMPLEXES ISOLANTS ÉTANCHES

ED-8

### Description (aspect visuel du désordre)

Les complexes isolants étanches sont protégés par un revêtement ou un habillage rapporté (tôles, béton projeté). Le produit est donc non visible.

Le désordre principal est l'humidité qui apparaît dans le revêtement ou au bord de la zone étanchée (souvent à la base du complexe).

### Méthodes d'examen

Examen visuel

### Paramètres à relever

Localisation – Surface concernée par le désordre – Débit des venues d'eau

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissuration (cas du béton projeté)

### Origines et causes possibles

Malfaçons à la pose – Perforation accidentelle en cours de chantier – Décollement sous l'effet de la projection du béton

### Facteurs aggravants

Venues d'eau sous pression – Chocs de véhicules sur la protection du complexe en intrados

### Conséquences, évolutions possibles

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

### Dangers pour les usagers

En cas de gel, formation de verglas et de stalactites de glace au droit des fuites

### Risques pour les structures

Aucun (en l'absence d'autres désordres)

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Étanchements ponctuels par injections si possible ou mise en oeuvre d'une autre technique de traitement des venues d'eau

### Observations

Impossible d'injecter une coque mince indépendante  
Se méfier des risques de colmatage des drainages en place

### Informations complémentaires

Les complexes isolants et étanches ont été utilisés en réparation de tunnels situés en site froid. Constitués de plaques, en mousse extrudée (d'épaisseur 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, 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, ou d'autres techniques, qui garantissent une totale étanchéité.

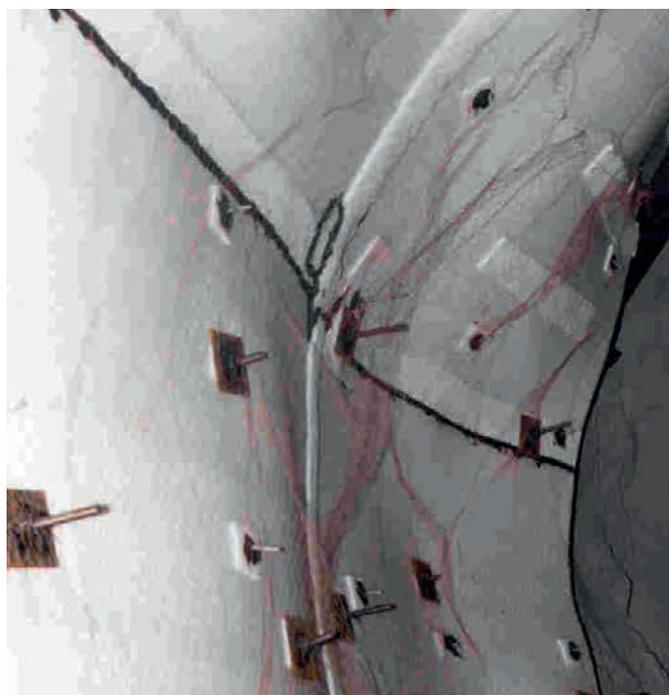


Figure 1 : isolation étanche (Ethafoam) avant la mise en place du treillis soudé et la projection du béton



Figure 2 : même ouvrage après quelques années d'exploitation

## DÉSORDRES DUS AUX JOINTS HYDROGONFLANTS

ED-9

### Description (aspect visuel du désordre)

Ces joints sont noyés dans le béton au niveau des reprises de bétonnage afin d'éviter la circulation d'eau ou la présence d'humidité. Ils gonflent au contact de l'eau, assurant ainsi l'étanchéité au droit des reprises de bétonnage des bétons coulés en place. Les désordres qui apparaissent sont dus au non-respect des conditions de mise en œuvre des joints (enrobage, armatures...) : les contraintes engendrées dans le béton par le gonflement du joint peuvent provoquer des éclatements du béton sur une épaisseur de plus de 10 cm.

### Méthodes d'examen

Examen visuel  
Examen sonore  
Auscultation au marteau

### Paramètres à relever

Localisation – Dimensions et profondeur des éclatements – Venues d'eau – Extension des zones d'armatures visibles – Degré de corrosion des armatures – Zones sonnantes creux

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Fissurations – Désaffleurements

### Origines et causes possibles

Non-respect des conditions de mise en œuvre

### Facteurs aggravants

Mauvaise qualité du béton – Absence de ferrailage – Présence de nid de cailloux au droit de la reprise de bétonnage

### Conséquences, évolutions possibles

Mise à nu et corrosion des armatures – Éclatement du béton – Infiltrations d'eau

### Dangers pour les usagers

Chute de débris sur la chaussée éventuellement

### Risques pour les structures

Fragilisation locale de la structure (perte d'épaisseur, corrosion des armatures, ...)

### Surveillance

Examen visuel  
Examen sonore

### Remèdes

Piquage du béton autour du joint  
Repose du joint ou pose d'un nouveau joint suivant les conditions de mise en œuvre  
Passivation éventuelle des armatures et réalisation d'un ragréage

### Observations

Les joints hydrogonflants doivent être utilisés avec beaucoup de précaution en respectant scrupuleusement les conditions de mise en œuvre.

### Informations complémentaires

Les joints hydrogonflants se présentent sous la forme de cordons, à base d'élastomère polyuréthane polymérisé (de type « Supercast SW20 »), qui gonflent au contact de l'eau. Ils sont destinés à limiter les infiltrations d'eau au droit des reprises de bétonnage des bétons coulés en place.

Leur utilisation est généralement limitée aux travaux de réparation ou de jonction entre un rameau neuf et un tunnel existant.

L'épaisseur des murs ou des radiers dans lesquels ces joints peuvent être incorporés ne doit pas être inférieure à 20 cm. Les joints doivent être systématiquement posés entre deux lits d'armatures et mis en place, si possible, dans l'axe de la section de reprise du bétonnage (avec, dans tous les cas, un enrobage minimum de 50 mm vis-à-vis des faces coffrées et à 70 mm minimum de la face du béton qui sera en contact avec l'eau). Les joints hydrogonflants ne doivent pas être en contact avec le tube de bétonnage, ni avec les aiguilles vibrantes, et le béton ne doit pas être déversé directement sur les joints.

Les désordres qui sont apparus sont dus à un non-respect des conditions de mise en œuvre.

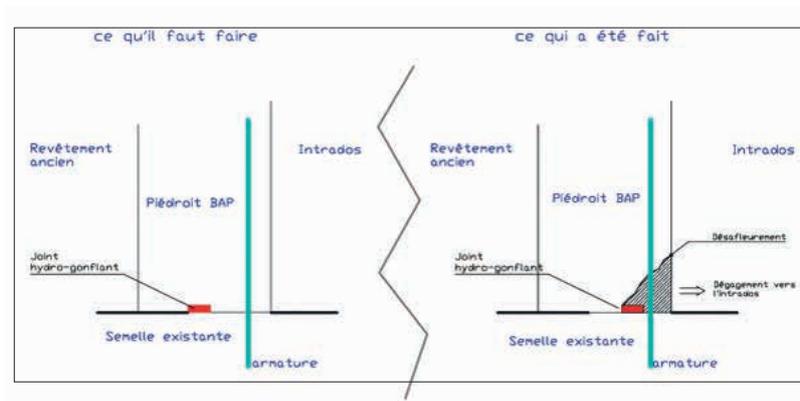


Figure 1 : schéma explicatif des désordres



Figure 2 : éclatement du béton au droit du joint à la jonction entre le trottoir et le piédroit

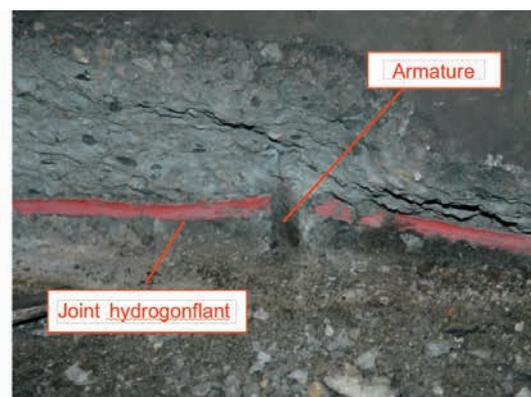


Figure 3 : mise à nu des armatures devant le joint

## DÉSORDRES AFFECTANT LA STRUCTURE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE – FISSURES

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des dispositifs d'étanchéité, de drainage et d'assainissement</b>	
Fissures structurelles longitudinales	FI-1
Fissures structurelles obliques	FI-2
Fissures structurelles transversales	FI-3
Fissures de retrait	FI-4
Fissures en lunule	FI-5

**FISSURES STRUCTURELLES LONGITUDINALES****FI-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Ces fissures ont un plan moyen parallèle à l'axe du tunnel.

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

Béton coffré : les ouvertures sont généralement plus grandes que celles dues au retrait normal

**Méthodes d'examen**

Examen visuel au contact

**Paramètres à relever**

Nombre de fissures – Extension (PM de début, PM de fin) – Ouverture – Désaffleurement – Rejet - Désordres au niveau des lèvres – Fissure affectant les moellons ou les contournant en restant dans les joints (maçonnerie) – Fissure affectant un seul ou plusieurs plots consécutifs (béton coffré)

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Déformations du revêtement – Zones sonnant le creux – Béton ou moellons écaillés – Fissuration anormale ou déformations en plateforme

**Origines et causes possibles, facteurs aggravants**

Fissure d'origine pathologique liée à une évolution du revêtement, avec ou sans influence du terrain encaissant en contact

**Facteurs aggravants**

Revêtement altéré (qualité des moellons et mortiers, ou du béton) – Défauts de butée – Vides en extrados

**Conséquences, évolutions possibles**

Fragilisation des abords immédiats de la fissure puis de la voûte

Augmentation de l'ouverture

Apparition de nouvelles fissures

Chutes de blocs

**Danger pour les usagers**

Faible (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)

Mesures régulières de l'ouverture et du désaffleurement (fissuromètres tridimensionnels)

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

Voir aussi fiches FI-4 (fissures de retrait) et DF-1 (aplatissement – pincement)

### 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, les fissures sont le signe d'un aplatissement du profil alors qu'un pincement (ou un méplat latéral) les fera apparaître en reins (aussi appelés naissances).

#### Bétons :

Le plus souvent, une fissure d'origine pathologique présentera une ouverture importante (supérieure à celle d'un retrait classique), un désaffleurement et des fracturations locales des lèvres. Elle peut s'exprimer sur une fissure de retrait préexistante, réactivée par le processus de déformation, ou sur une reprise de bétonnage.



Figure 1 : 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)

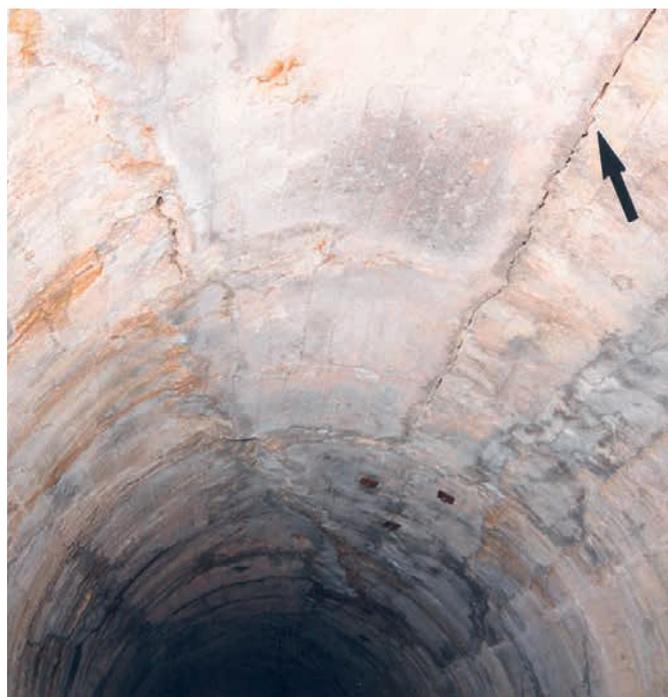


Figure 2 : fissure longitudinale en béton coffré liée à une déformation du revêtement sous la poussée du terrain encaissant (la fissure s'exprime le long d'une reprise de bétonnage)

## FISSURES STRUCTURELLES OBLIQUES

FI-2

### Description (aspect visuel du désordre)

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

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

Béton coffré : les ouvertures sont généralement plus grandes que celles dues au retrait normal.

### Méthodes d'examen

Examen visuel au contact

### Paramètres à relever

Nombre de fissures – Extension (PM de début, PM de fin) – Ouverture – Désaffleurement – Rejet – Désordres au niveau des lèvres – Fissure affectant les moellons ou les contournant dans les joints (maçonnerie) – Fissure suivant ou non une reprise de gâchée (bétons)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Maçonneries : Déformations du revêtement – Zones sonnant le creux – Moellons dégradés

Maçonneries et béton coffré : Formation de panneaux instables (si des fissures sont sécantes) – Fissuration des bordures et trottoirs – Fissures ou déformations en chaussée

### Origines et causes possibles

Fissure d'origine pathologique souvent liée à une action du terrain – Tassement différentiel – Déformation de la voûte en torsion ou cisaillement oblique par rapport à l'axe

### Facteurs aggravants

Revêtement altéré – Vides en extradados

### Conséquences, évolutions possibles

Fragilisation des abords immédiats de la fissure

Formation de petits panneaux instables situés entre plusieurs fissures en relief

Rupture de la structure

### Dangers pour les usagers

Faible (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)

Mesures régulières de l'ouverture et du désaffleurement (fissuromètres tridimensionnels)

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 rapide ou d'instabilité

## Informations complémentaires

La fissuration oblique, appelée aussi biaise, 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 à prendre au sérieux, car il peut constituer l'indication d'un problème grave pour la structure (basculement d'une tête, tassement de fondation, glissement du versant, gonflement, fluage, faille active).

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



*Figure 1 : 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, un fissuromètre instrumente une fissure – le tunnel a dû être fermé quelques années plus tard)*

**FISSURES STRUCTURELLES TRANSVERSALES****FI-3****Description (aspect visuel du désordre)**

Les fissures peuvent affecter tout ou partie du profil. Leur plan moyen est perpendiculaire à l'axe du tunnel.

Maçonnerie : elles suivent généralement les joints de mortier ou les joints de reprise verticaux entre deux anneaux en moellons (harpes de liaison).

Béton coffré : les ouvertures sont généralement plus grandes que celles dues au retrait normal.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel au contact

**Paramètres à relever**

Nombre de fissures – Extension – Ouverture – Localisation – Désaffleurement – Rejet – Désordres au niveau des lèvres – Fissure affectant les moellons ou les contournant en restant dans les joints (maçonnerie)

**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 et causes possibles**

Défaut assez courant des harpes de liaison (maçonnerie) – Déformation ou changement d'épaisseur du revêtement – Cisaillement du revêtement (béton coffré) – Tassement différentiel

**Facteurs aggravants**

Revêtement altéré – Terrain encaissant évolutif – Défauts de butée entre voûte et terrain – Défaut d'assise

**Conséquences, évolutions possibles**

Fragilisation des abords immédiats de la fissure

Augmentation de l'ouverture

Augmentation du désaffleurement

**Dangers pour les usagers**

Faible (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)

Mesures régulières de l'ouverture et du désaffleurement (fissuromètres tridimensionnels)

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

Voir aussi fiche FI-4 (fissures de retrait)

#### 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. 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).

On doit s'attacher à déterminer si elle apparaît sur une discontinuité d'origine (reprise de maçonnerie, harpe de liaison) ou si elle a d'autres origines.

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

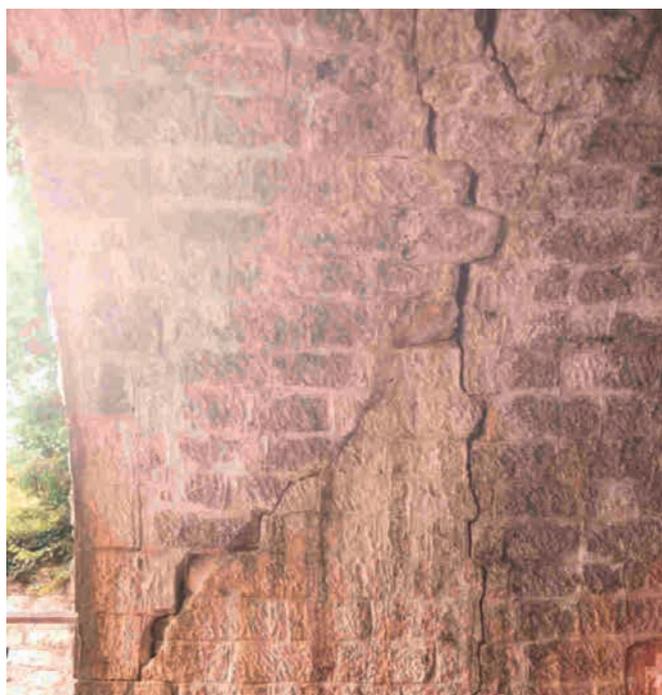


Figure 1 : fissure transversale couplée à une fissure oblique

**FISSURES DE RETRAIT****FI-4****Description (aspect visuel du désordre)**

Il s'agit de fissures fines dont la longueur augmente avec le temps (visibles à partir de 0,1 mm). Elles ne montrent aucun désaffleurement des lèvres. Sur les revêtements en béton coffré non armé, les ouvertures sont rarement supérieures à 3 mm.

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.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel rapproché sous éclairage puissant  
Relevés scanner en lumière visible

**Paramètres à relever**

Position – Densité – Maillage ouvert ou fermé – Ouvertures

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Venues d'eau par les fissures (tunnels sans étanchéité en extrados) – Zones sonnantes creux – Humidité

**Origines et causes possibles**

Le retrait est l'expression du vieillissement normal du béton. Les fissures dues au retrait dans un béton non armé ne constituent ni un désordre ni un défaut.

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

**Facteurs aggravants**

Mauvaise qualité du béton ou au contraire fort dosage en ciment – Armatures dans le béton en l'absence d'étanchéité d'extrados – Infiltrations d'eau – Gel-dégel – Contraintes dans le revêtement

**Conséquences, évolutions possibles**

Altération du béton par les venues d'eau (tunnels sans étanchéité en extrados) – Corrosion des armatures – Fermeture ou ouverture des fissures en cas de déformation du profil

**Dangers pour les usagers**

Aucun danger

**Risques pour les structures**

Aucun risque

**Surveillance**

Examen visuel  
Levé des fissures

Quantification des linéaires

Mise sous surveillance (fissuromètres) si une fissure attribuée initialement au retrait s'ouvre de façon anormale ou présente un désaffleurement

**Remèdes**

Aucune réparation (sauf injection de résine dans un but d'étanchement)

Voir aussi fiches FI-1 (fissures structurelles longitudinales) et FI-3 (fissures structurelles transversales)

### Informations complémentaires

La fissuration de retrait ne constitue pas un désordre en soi. Elle exprime la diminution de volume accompagnant la prise puis la dessiccation du béton ainsi que la gêne du retrait.

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, même sommaire, doit permettre de la différencier des fissures d'origine pathologique.

#### Bétons coffrés non armés « modernes »

Leur composition est souvent bien maîtrisée ; leur mise en place s'effectue dans des coffrages de bonne qualité ; la vibration homogénéise bien les gâchées 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 1 illustre quelques formes classiques de son expression :

- les fissures transversales (1) se développent à partir de la base du piédroit ; 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 en clé.

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 est suspecte et demande éventuellement une instrumentation de surveillance.

On constate que, dans les revêtements récents protégés par une étanchéité totale en extrados, 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 coffrés non armés « 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 (fort dosage en eau) 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 contraignent 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 fermé, 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 armés de fibres sont peu ou pas fissurés.

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

Le retrait du béton projeté par voie sèche bien maîtrisée est plus limité du fait d'une très faible teneur en eau.

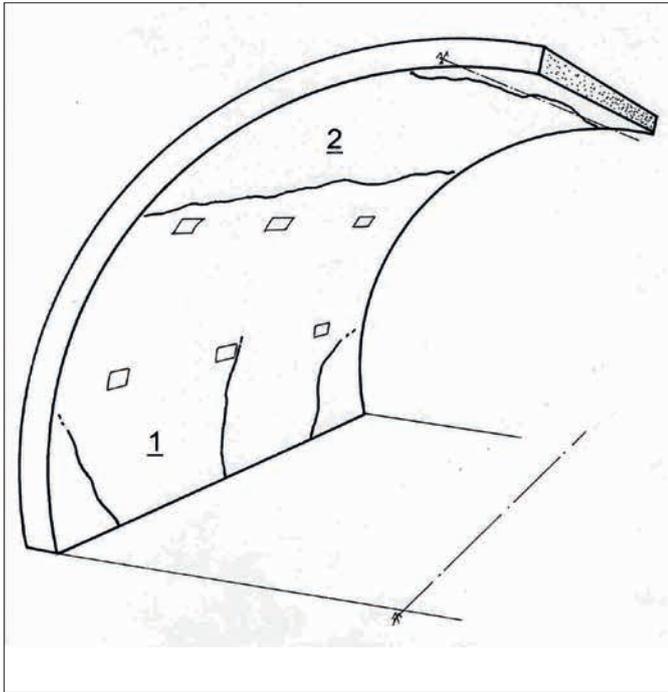


Figure 1 : expressions habituelles du retrait au sein d'un anneau (béton « moderne » avec étanchéité en extrados)



Figure 2 : expressions du retrait au sein d'un béton de 1970 sans étanchéité en extrados

## FISSURES EN LUNULES

FI-5

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit d'une fissure régulière et courbe, généralement située en calotte ou 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  
Examen sonore (au marteau)

### Paramètres à relever

Ouverture – Désaffleurement – Dimensions du panneau

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Zone sonnante le creux (panneau relativement mince et désolidarisé du reste de l'anneau)

### Origines et causes possibles

Fissure de rupture provoquée par l'appui du coffrage de l'anneau successif sur l'anneau 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.

### Facteurs aggravants

Clavage incomplet (vide entre le béton et le soutènement ou le terrain)

### Conséquences, évolutions possibles

Déstabilisation du panneau en cas de voûte mince

### Dangers pour les usagers

Aucun (pour les cas connus jusqu'à présent) mais à vérifier attentivement pour les structures minces

### Risques pour les structures

Aucun (pour les cas connus jusqu'à présent)

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Injection des fissures

### Observations

Ce type de désordre est généralement réparé directement sur le chantier par des injections de résine époxy. S'agissant de malfaçons, il est préférable d'exiger réparation pour éviter une surveillance renforcée.

### 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, plus rarement sur l'axe de clé. Il apparaît en bordure 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 des 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 n'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, annuellement pendant de nombreuses années pour des structures minces non injectées.



*Figure 1 : lunules imbriquées en rein (la base de la photo correspond au trottoir ; le bétonnage s'est fait de la droite vers la gauche)*

## DÉSORDRES AFFECTANT LA STRUCTURE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE – DÉFORMATIONS

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage – Déformations</b>	
Aplatissement – Pincement – Méplat	DF-1
Ventre	DF-2
Désaffleurement d'assises de moellons ou de briques	DF-3
Désordres des radiers	DF-4
Rupture de voûte	DF-5

**APLATISSEMENT – PINCEMENT – MÉPLAT****DF-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Aplatissement : il s'agit d'une augmentation du rayon de courbure de la partie supérieure de la voûte.

Pincement : la partie supérieure de la voûte se déforme avec un rapprochement des reins et la remontée de la clé (profil transversal en ogive).

Méplat : cette déformation n'affecte qu'un seul côté de la voûte, entre le pied et le rein, par augmentation du rayon de courbure.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel (rasant pour le méplat)

**Paramètres à relever**

Localisation (PM de début, PM de fin) – Surface – Amplitude de la déformation (difficile à mesurer sans profilométrie) – Désordre d'origine ou plus tardif (forte probabilité de désordres associés dans le dernier cas)

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Aplatissement : Fissuration ouverte en clé – Écaillage en naissances

Pincement : Fissuration ouverte en naissances – Écaillage en clé – Joints ouverts – Moellons descellés

Méplat : Fissuration longitudinale ouverte dans le méplat – Fissures de cisaillement – Écaillage en clé – Zone sonnante creux – Venues d'eau

**Origines et causes possibles**

Aplatissement : Déformations d'origine (assez fréquentes dans les vieilles maçonneries) – Gonflements du terrain – Diminution de la butée latérale – Décohésion et appui du terrain sur la clé de voûte

Pincement : Déformations d'origine (assez fréquentes dans les vieilles maçonneries) – Forte contrainte horizontale – Mauvais clavage en clé – Gonflement du terrain

Méplat : 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

**Facteurs aggravants**

Drainage défectueux – Défaut d'entretien des joints – Terrains hétérogènes (pour les méplats)

**Conséquences, évolutions possibles**

Accentuation des déformations

Chutes ou écaillage de moellons

Rupture de la voûte

**Dangers pour les usagers**

Nul si déformation de construction

Faible à fort (évolution rapide) si le désordre n'est pas un défaut de construction (rétrécissement latéral de la section, chocs ou frottements répétés de véhicules lourds, risque de chute d'écaillés ou de moellons)

**Risques pour les structures**

Affaiblissement

**Surveillance**

Examen visuel plus fréquent

Mesures de déformation (convergences relatives, profilométrie)

Mesures de contraintes

Renforcement (mise en place de cintres et injection d'extrados, boulonnage, chemisage en béton projeté, ...)  
Reconstruction

À distinguer de « ventre » (fiche DF-2)

### Aplatissement

Ce terme est réservé au désordre qui affecte la calotte de façon symétrique. Il ne se voit bien que par un examen visuel rasant du parement (depuis une nacelle placée au ras de la clé de voûte, par exemple).

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 reins.

### Pincement

Le terme de pincement 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 reins, ainsi que d'écaillage en clé de voûte.

### Méplat

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 peut 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.

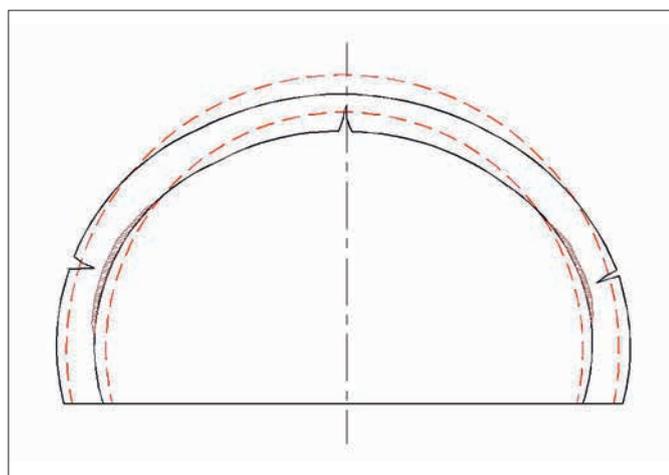


Figure 1 : schéma simplifié des déformations du revêtement subissant un aplatissement (les zones hachurées indiquent les zones en compression, par rapport aux zones en extensions (fissures))  
[en pointillé : profil théorique, en trait plein : profil déformé]

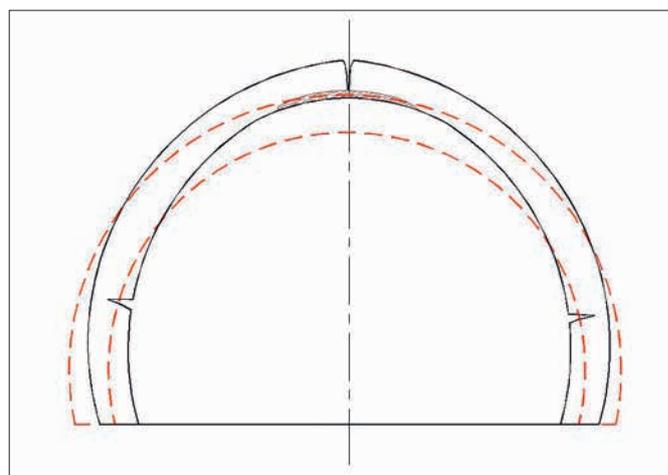


Figure 2 : schéma simplifié des déformations du revêtement subissant un pincement (les zones hachurées indiquent les zones en compression, par rapport aux zones en extensions -fissures-)  
[en pointillé : profil théorique, en trait plein : profil déformé]



Figure 3 : pincement de clé (déjà réparé en partie avec du béton coffré non armé, il se poursuit par écrasement des moellons de clé restants et du béton)

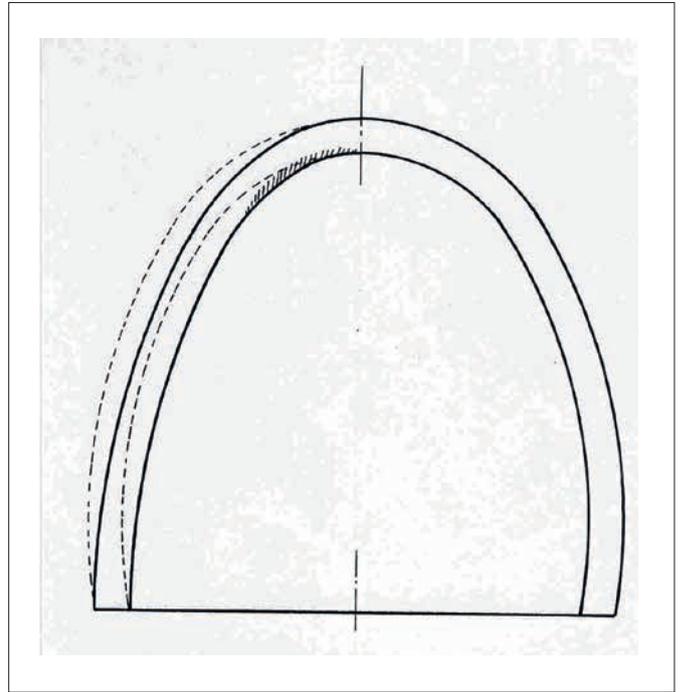


Figure 4 : schéma simplifié des déformations du revêtement subissant un méplat (les zones hachurées indiquent les zones en compression)  
[en pointillé : profil théorique, en trait plein : profil déformé]

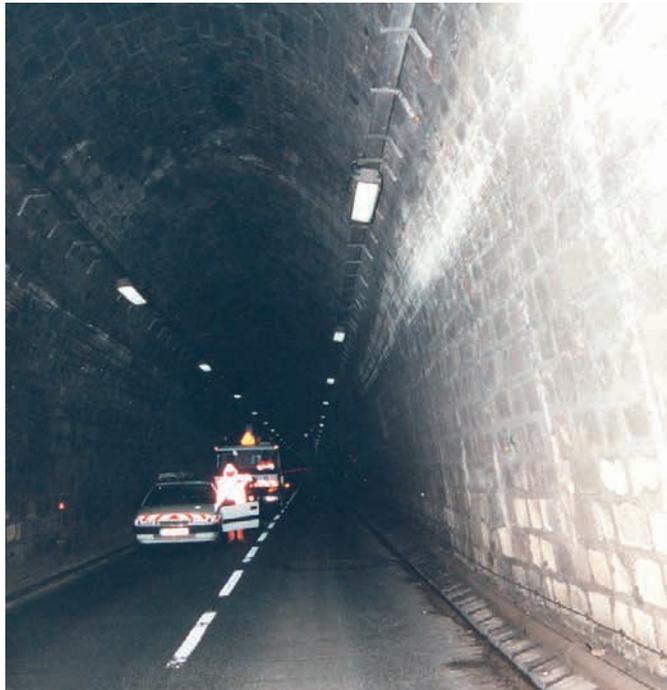


Figure 5 : méplat (la partie claire a perdu sa courbure d'origine)

## VENTRE

DF-2

### Description (aspect visuel du désordre)

Un ventre est un 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  
Examen sonore (auscultation au marteau)

### Paramètres à relever

Localisation (PM de début, PM de fin) – Position dans le profil – Surface – Avancée maximum – Réponse sonore au marteau

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Altération du mortier et des moellons – Moellons tombés ou déchaussés – Humidité – Fissuration

### Origines et causes possibles

Ventre à la construction : Déformation du cintre – Reprise d'œuvre  
Apparition ultérieure : Affaissement de la maçonnerie par altération des mortiers – Poussée du terrain ou du blocage

### Facteurs aggravants

Fissures longitudinales – Glissement d'assises de moellons – Drainage défectueux – Défaut d'entretien des joints

### Conséquences, évolutions possibles

Ruine localisée ou chute de moellons progressivement descellés

### Dangers pour les usagers

En dehors d'un rétrécissement localisé, le danger pour les usagers est lié à la résistance de la structure elle-même.

### Risques pour les structures

Affaiblissement puis ruine locale rapide

### Surveillance

Examen visuel  
Examen sonore  
Mesures de l'avancée (simples s'il s'agit d'un ventre en piédroit, par fil à plomb ou règle)

### Remèdes

Rejointoiement  
Ancrages et liernes  
Reconstruction si le terrain est en cause

### Observations

À distinguer de « méplat » (fiche DF-1)

### Informations complémentaires

Le terme « ventre » est utilisé le plus souvent pour désigner les déformations des piédroits en maçonnerie 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 creux lors de l'auscultation au marteau.

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 par la suite. S'il n'y a aucun autre désordre associé au ventre, il est vraisemblablement de construction.

Certains ventres ne sont liés 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 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.

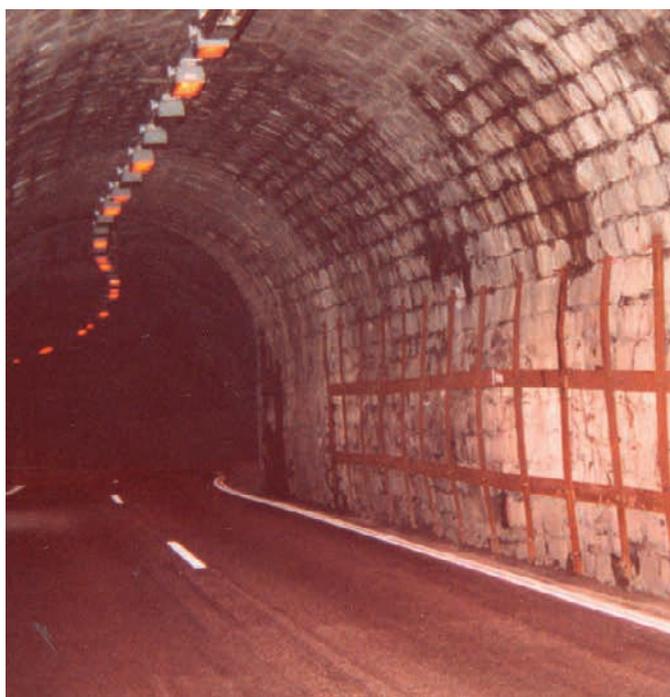


Figure 1 : ventre de piédroit, conforté par ancrages et larges plats



Figure 2 : ventre de piédroit proche de la ruine (maçonnerie très altérée)

## DÉS AFFLEUREMENT D'ASSISES DE MOELLONS OU DE BRIQUES

DF-3

### 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 – Auscultation sonore (marteau)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Ouverture de joints longitudinaux – Fissurations – Déjointoiements – Déformation générale du profil – Ventre local

### Origines et causes possibles, facteurs aggravants

En piédroits et naissances, défaut de construction à la reprise (le plus souvent)  
En calotte, mauvaise mise en place des rangées de moellons ou désorganisation locale due au souffle d'une explosion (tir de mine en radier, fait de guerre)

### Facteurs aggravants

Déjointoiement – Venues d'eau – Qualité des moellons

### Conséquences, évolutions possibles

Désaffleurement de construction : Aucune conséquence  
Désaffleurement accidentel : Fragilisation, voire désorganisation locale, et risque d'une altération accélérée

### Dangers pour les usagers

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

### Risques pour les structures

Nul si le désaffleurement est d'origine  
Affaiblissement du revêtement si la cause est accidentelle

### Surveillance

Examen visuel

### Remèdes

Renforcement par boulonnage, par béton projeté (armé ou non armé)

### Observations

### Informations complémentaires

Les moellons ne sont pas alignés et 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. Cependant, 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, 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 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 à la construction. S'il ne s'agit pas d'un défaut de construction, il est probable que le désaffleurement soit un symptôme de ruine ou d'altération poussée de la structure.

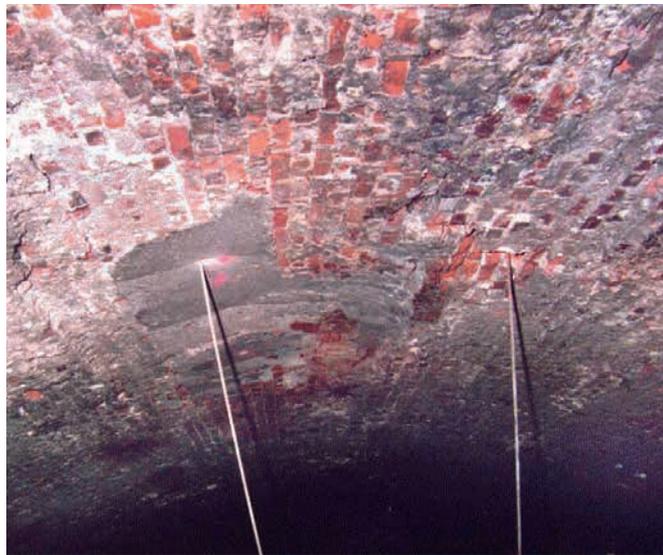


Figure 1 : soufflage (la partie centrale de la calotte a été soulevée par le tir, puis est retombée en place avec des décalages dans les rangs de briques ; les tiges matérialisent la position des forages de reconnaissance)

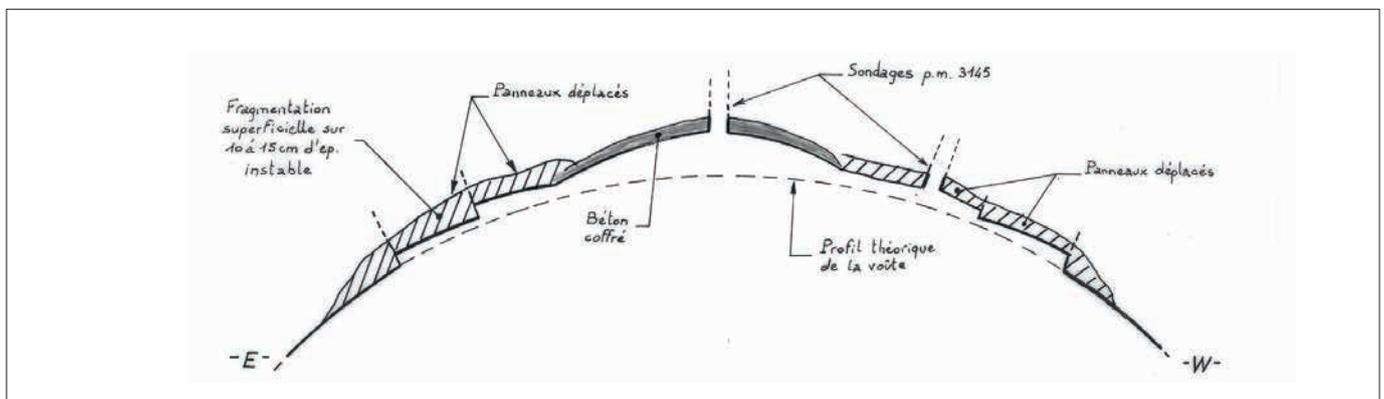


Figure 2 : représentation interprétée des désordres de la zone « soufflée »

## DÉSORDRES DES RADIERS

DF-4

### Description (aspect visuel du désordre)

Le désordre se présente souvent sous la forme d'un soulèvement ou d'un affaissement localisé du radier, se traduisant par la présence d'une fissuration longitudinale, et parfois transversale, avec un désaffleurement des lèvres. Lorsque le radier n'est pas visible, seuls les désordres se manifestant au niveau de la chaussée ou des piédroits sont détectés.

C'est parfois l'absence de radier ou leur sous-dimensionnement qui ne permet pas de lutter contre un gonflement du terrain (type argiles ou marnes gonflantes).

### Méthodes d'examen

Examen visuel  
Mesures topométriques  
Examen sonore

### Paramètres à relever

Localisation – Extension – Hauteur du soulèvement – Nature du terrain et du radier (recherche dans le dossier d'ouvrage)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Venues d'eau – Désordres anormaux en voûte (écaillage en clé, densité et forme de fissuration différentes) et en piédroits

### Origines et causes possibles

Soulèvement : Gonflement du terrain encaissant – Pression latérale élevée – Fluage – Charge d'eau importante

Affaissement : Défaut de portance du terrain dû à sa nature et à la présence d'eau – Tassements ou création de vides

### Facteurs aggravants

Soulèvement : Venues d'eau sous pression – Résistance du radier insuffisante (épaisseur ou caractéristiques mécaniques) – Mauvais raccordement entre le radier et les piédroits

Affaissement : Fuites des systèmes de drainage (ou d'assainissement) – Terrain d'assise évolutif (gypseux ou argileux) – Battement de la nappe – Entraînement de fines

### Conséquences, évolutions possibles

Déformation d'anneaux – Dislocation du radier – Effondrement de la structure par perte du butonnage entre piédroits

### Dangers pour les usagers

Risque d'effondrement ou chaussée déformée

### Risques pour les structures

Affaiblissement de la structure – Effondrement localisé

### Surveillance

Examen visuel  
Mesures topométriques  
Examen sonore  
Mesures régulières de l'ouverture et du désaffleurement (fissuromètres tridimensionnels)  
Mesures de déformations du profil (convergences relatives)  
Mise en place d'une surveillance renforcée ou d'une haute surveillance (selon les résultats des mesures)

### Remèdes

À adapter après étude spécifique (Reconstruction du radier ou renforcement de l'anneau, drainage du terrain)

**Observations****Informations complémentaires**

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 une voûte renforcée.

Si une déformation de la structure par une évolution du terrain encaissant (pincement des piédroits par gonflement du terrain, tunnel recoupé par un plan de glissement de versant) provoque leur rupture, celle-ci se manifeste par un soulèvement ou un affaissement, une fissuration et une dislocation du radier.

L'affaissement peut aussi survenir à la suite d'un dysfonctionnement des systèmes de drainage et d'assainissement (dans une moindre mesure) : l'eau circulant à la périphérie du tube peut alors altérer les couches d'assise du radier, dans le cas de terrains évolutifs. Les caractéristiques mécaniques de ces sols sont alors modifiées (portance plus faible) et, sous l'influence des charges liées au trafic, les désordres apparaissent.

Les facteurs aggravants sont une circulation d'eau dans le terrain, une insuffisance d'épaisseur ou de résistance du radier, ainsi qu'une courbure insuffisante ou une mauvaise jonction entre le radier et les piédroits.

La réparation nécessite une démolition préalable, qui doit être effectuée avec précaution, par plots réduits, pour éviter le resserrement des piédroits pendant le laps de temps où ils ne sont plus butonnés.

Lorsque le radier n'est pas visible, les désordres se manifestent principalement par une fissuration et un soulèvement de la chaussée.

On ne connaît, pour l'instant, aucun désordre structurel pouvant provenir du comportement anormal d'un radier dans un tunnel du réseau routier national non concédé.

## RUPTURE DE VOÛTE

DF-5

### Description (aspect visuel du désordre)

La rupture d'une voûte est précédée de signes annonciateurs.

Maçonneries : Fissures très ouvertes – Ecaillages prononcés – Chutes de moellons – Disparition du mortier – Déformations du profil

Bétons : Fissures très ouvertes – Lèvres décalées – Ecaillage fort du béton – Panneaux basculés

### Méthodes d'examen

Examen visuel et sonore (auscultation marteau)

### Paramètres à relever

Caractéristiques des fissures (localisation, ouverture, longueur, désaffleurement)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Présence de panneaux instables – Altération des matériaux – Venues d'eau – Nature du terrain encaissant ou du remblai éventuel (têtes) – Ventre – Aplatissement – Méplat – Pincement

### Origines et causes possibles

Action du terrain encaissant – Surcharge de la voûte – Altération totale du revêtement

### Facteurs aggravants

Terrains évolutifs gonflants – Qualité du béton ou du mortier de jointoiment

### Conséquences, évolutions possibles

Accélération et extension du phénomène

Ruine de l'ouvrage

### Dangers pour les usagers

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

### Risques pour les structures

Effondrement

### Surveillance

Examen visuel et sonore

Mise sous haute surveillance

### Remèdes

Renforcements ou reconstruction

### Observations

### Informations complémentaires

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

#### 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 événement réside le plus souvent dans une altération complète des mortiers. 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.

#### Bétons coffrés non armés

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.

#### Bétons projetés non armés ou non fibrés

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.



Figure 1 : moitié de voûte 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'est pas en cause)

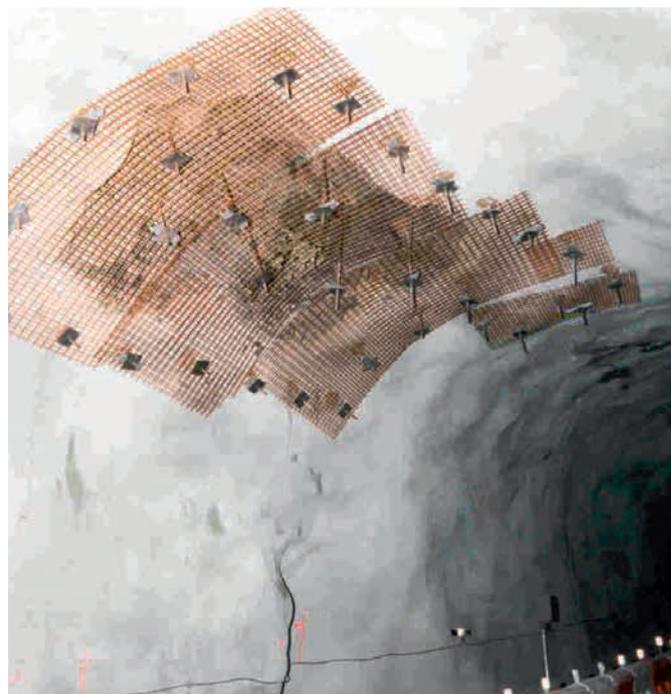


Figure 2 : gonflement de marnes ayant rompu un revêtement en béton projeté sans treillis soudé (réparation en cours)



Figure 3 : rupture d'une voûte en béton coffré armé sous l'action de sollicitations trop élevées

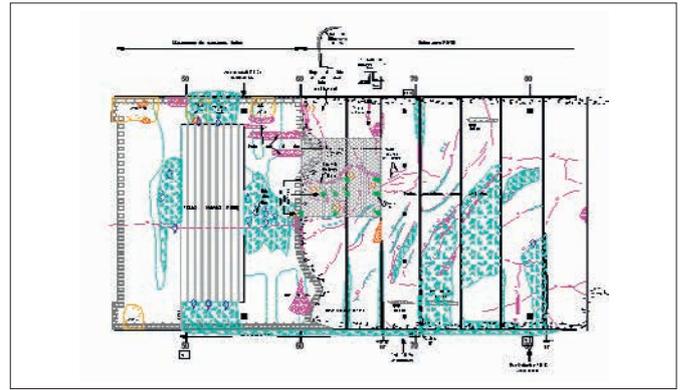
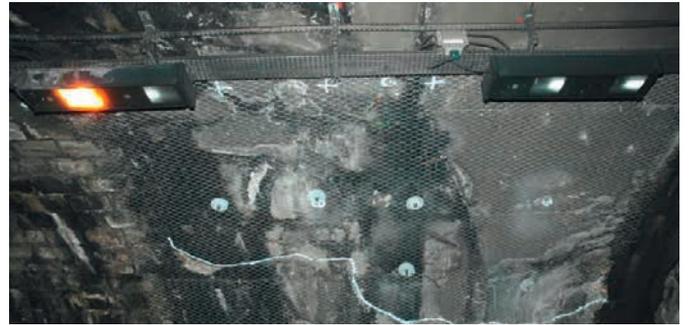


Figure 4a et 4b : rupture de la demi-voûte en béton armé avec fissure de cisaillement



## 2.9 DÉSORDRES AFFECTANT LA STRUCTURE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE – DÉSORDRES LIÉS À LA MISE EN ŒUVRE

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage – Désordres liés à la mise en œuvre</b>	
Culots de tir instables	MO-1
Vides dans les revêtements à proximité de l'intrados	MO-2
Nids de cailloux	MO-3
Désordres des joints de bétonnage	MO-4
Défauts d'aspect des bétons coffrés	MO-5

CULOTS DE TIR INSTABLES	MO-1
<b>Description (aspect visuel du désordre)</b>	
Les culots de tir instables se présentent sous forme de fissures rayonnantes autour d'un forage de tir à l'explosif.	
<b>Méthodes d'examen</b>	
Examen visuel autour (ou à l'extrémité) de certaines « cannes de tir » visibles sur le parement Examen sonore (auscultation au marteau)	
<b>Paramètres à relever</b>	
Étendue – Volumes unitaires et volume global des blocs instables	
<b>Désordres ou défauts associés à rechercher</b>	
Blocs lâchés	
<b>Origines et causes possibles</b>	
Déroctages anciens – Fort écart angulaire des forages de tir par rapport à l'axe – Charge explosive trop forte – Purge incomplète après le tir	
<b>Facteurs aggravants</b>	
Forte fracturation originelle de la roche – Profil en travers ou en long défavorable	
<b>Conséquences, évolutions possibles</b>	
Fréquentes instabilités de blocs (forte décohésion évolutive de l'excavation)	
<b>Dangers pour les usagers</b>	
Chutes de blocs	
<b>Risques pour les structures</b>	
Faible à nul Dommages aux équipements en cas de chute d'éléments	
<b>Surveillance</b>	
Examen visuel (noter la fréquence des chutes de débris ou de blocs)	
<b>Remèdes</b>	
Purges périodiques	
<b>Observations</b>	
Voir aussi fiche NR-1 (blocs ou masses 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 est attribué autant à une charge unitaire trop forte qu'à une purge incomplète de l'excavation après les tirs. Le 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.



*Figure 1 : calcaire dérocté au début du XIXème siècle  
[on distingue les fractures rayonnantes autour du forage de tir ;  
l'ensemble de la roche est désorganisé et instable]*

## VIDES DANS LES REVÊTEMENTS À PROXIMITÉ DE L'INTRADOS

MO-2

## Description (aspect visuel du désordre)

Un vide proche de l'intrados est un défaut ou un désordre, au sein d'un matériau ou d'une structure, qu'il faut s'attacher à qualifier. Il se révèle à l'inspection par un son creux.

## Méthode d'examen

Examen sonore par martelage du revêtement, en s'attachant à interpréter la réponse du support (son clair, son caverneux)

## Paramètres à relever

Position dans la voûte – Surface affectée – Type de sonorité

## Désordres ou défauts associés à rechercher

Déformation du revêtement (maçonnerie) – Fissuration plus dense ou anormale (béton) – Défauts indiquant une faiblesse de la voûte (altération, fissures, venues d'eau, ...) – Armatures corrodées (béton armé)

## Origines et causes possibles

Maçonnerie : Mauvaise cohésion (d'origine ou d'altération) – Revêtement mince pas ou mal bloqué au terrain – Exfoliation – Ecaillage  
Béton coffré : Mauvais remplissage (calotte) – Etanchéité déplacée ou déchirée – Faible épaisseur – Ecaillage – Eclatement sur fers  
Béton projeté : Mauvaise adhérence au support – Support altéré

## Facteurs aggravants

Ceux liés aux désordres associés

## Conséquences, évolutions possibles

Maçonnerie, béton coffré, béton projeté : Evolutions liées aux désordres associés

## Dangers pour les usagers

Ceux liés aux désordres associés

## Risques pour les structures

Maçonnerie : Aggravation des défauts associés  
Béton coffré : Vieillissement plus rapide de la zone affaiblie  
Béton projeté : Aggravation des défauts associés

## Surveillance

Examen visuel et sonore (fréquence à adapter à l'importance du phénomène)  
 Mesures régulières des surfaces sonnantes creux

## Remèdes

Revêtements anciens : Toutes les zones sonnantes creux ne sont pas redevables de réparations ; elles sont à définir en fonction de reconnaissances complémentaires.  
Bétons récents : Injection des vides suite à un défaut de bétonnage (malfaçon)

## Observations

Voir aussi fiche ED-4 (feuille d'étanchéité)

Les vides dans le revêtement, à proximité de l'intrados, sont souvent détectés par la réponse sonore du matériau au choc d'un marteau. La démarche doit respecter les étapes suivantes : délimiter la zone par martelage et la reporter sur le levé de voûte, tenter de déceler la partie de zone la plus critique et rechercher les défauts ou désordres associés.

### 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 calotte doit être sondée et particulièrement la zone de clé de voûte dont on sait qu'elle est généralement mal bloquée au terrain.

### Béton coffré non armé

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). A titre d'exemple, un son très caverneux dans un béton récent indique une épaisseur inférieure à 10 cm.

Des zones de vides 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 m<sup>2</sup>).



*Figure 1 : vide d'origine à l'extrados d'un béton très altéré  
[le revêtement sonnait creux est instable autour de l'ouverture]*

### Béton coffré armé

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



*Figure 2 : fenêtre de reconnaissance ouverte sur une zone sonnante fortement le creux [vide extradados de 27 cm par défaut de bétonnage]*

### Béton projeté

Les zones de vides sont fréquentes et tiennent soit à des défauts d'adhérence, en particulier en cas de mauvais enrobage de treillis, 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.

## NIDS DE CAILLOUX

MO-3

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit de 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  
Examen sonore (auscultation au marteau)

### Paramètres à relever

Superficie – Localisation (défaut local ou extension à l'ensemble de l'anneau, situé aux abords des lèvres d'un joint) – Origine (liée à une reprise de bétonnage)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Béton désagrégé – Zones sonnante creux autour du défaut – Humidité

### Origines et causes possibles

Défaut local lié à la mise en place du béton (influence de la vibration) – Ségrégation locale du matériau – Qualité du béton (mauvaise granulométrie des constituants)

Nota : Certains bétons anciens ont un aspect « nid de cailloux » généralisé, bien que les granulats soient très bien liés.

### Facteurs aggravants

Circulation d'eau (altération d'origine chimique, érosion) – Gel-dégel

### Conséquences, évolutions possibles

Approfondissement de la poche par altération du béton et chute progressive des granulats  
Mise à nu des armatures (anneau en béton armé)

### Dangers pour les usagers

Chutes de granulats ou de petits blocs de béton

### Risques pour les structures

Affaiblissement local du revêtement

### Surveillance

Examen visuel (mesure de l'approfondissement éventuel, de l'extension du désordre)  
Examen sonore

### Remèdes

Purges périodiques préventives  
Réparation de la zone (ragréage, béton projeté et armature épinglée)

### Observations

### Informations complémentaires

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

Il peut avoir plusieurs origines :

- un mauvais malaxage,
- une ségrégation au cours du bétonnage,
- une 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 situé dans des zones où la vibration est difficile (bordures d'anneau).

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

Les nids de cailloux sont courants dans les bétons anciens pour lesquels les gâchées étaient nombreuses, de faible volume et 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.



Figure 1 : nids de cailloux sur un revêtement en béton de 1936 [chaque montée de béton est soulignée par un alignement de nids de cailloux, perméable et parfaitement horizontal dû à un mauvais bétonnage]

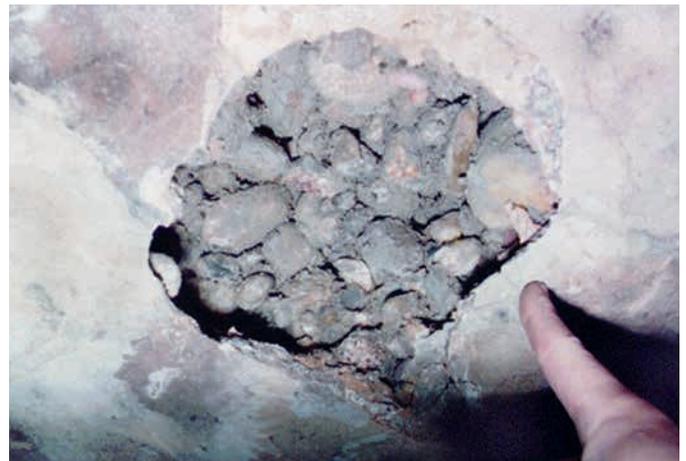


Figure 2 : nid de cailloux initialement masqué par une pellicule de laitance [son étendue ne peut être cartographiée qu'à l'aide de l'auscultation au marteau]

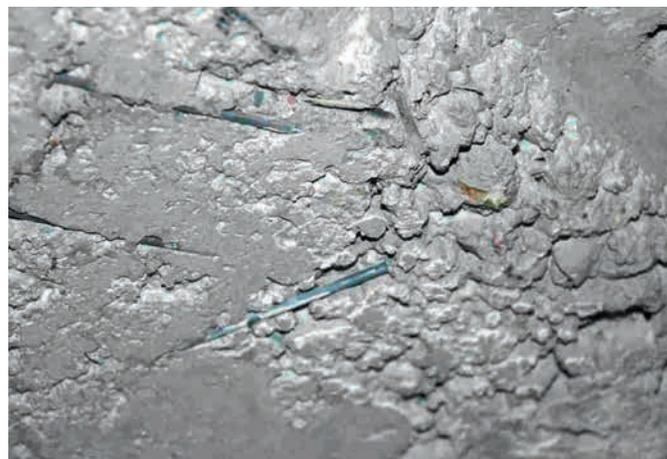


Figure 3 : nid de cailloux

## DÉSORDRES DES JOINTS DE BÉTONNAGE

MO-4

### Description (aspect visuel du désordre)

Il s'agit d'un désordre affectant la linéarité, la forme ou le remplissage d'un joint séparant deux anneaux de béton coffré contigus. Les lèvres du joint peuvent alors présenter des épaufrures, des écailles et des fissures, à l'origine d'une altération ultérieure du béton.

### Méthodes d'examen

Examen visuel (prévoir la vérification systématique du remplissage de fond de joint)  
Examen sonore (auscultation au marteau)

### Paramètres à relever

Localisation – Extension – Zone sonnante creux (les ragréages sur le joint se décollent toujours au fil du temps) – Toute mesure adaptée à la quantification du désordre

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Humidité

### Origines et causes possibles

Malfaçons – Mouvements relatifs entre anneaux

### Facteurs aggravants

Mauvaise qualité du béton (compacité, nids de cailloux)

### Conséquences, évolutions possibles

Extension  
Chute de débris

### 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  
Examen sonore

### Remèdes

Purges de sécurité (éventuellement, mise en place grillage de sécurité temporaire)  
Reconstitution en profondeur des lèvres (il faut laisser au joint sa liberté de mouvement ; tout ragréage superficiel est à proscrire)

### Observations

La présence de résidu de béton sur les joints de bétonnage est très fréquente dans les tunnels récents.

Les joints entre anneaux de béton coffré revêtent plusieurs aspects :

- joints secs : ils peuvent être sans traitement particulier, parfois marqués en creux (un profilé collé sur le coffrage permet la réalisation d'une saignée entre deux anneaux) ou avoir fait l'objet d'un ragréage en mortier de ciment ;
- joints avec des bandes en élastomère : mis en place lors du bétonnage, ces bandes présentent des renflements sur les bords et, souvent, un tube dans leur partie centrale ; les renflements sont destinés à assurer le calage dans la masse du béton et le tube garantit l'étanchéité, même en cas de mouvement.

Les principaux désordres relevés sur ces joints sont :

- le déplacement de la fissure de joint dans l'un des anneaux ; l'une des lèvres présente alors un décollement de plaque ;
- la 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 ;
- des décollements et chutes de béton liés au mauvais coffrage du fond de joint ;
- des décollements et chutes du ragréage mis en place sur les joints à des fins esthétiques ou aérauliques (en gaines de ventilation).

Des 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 par la figure 2.



Figure 1 : désordres sur un joint en élastomère

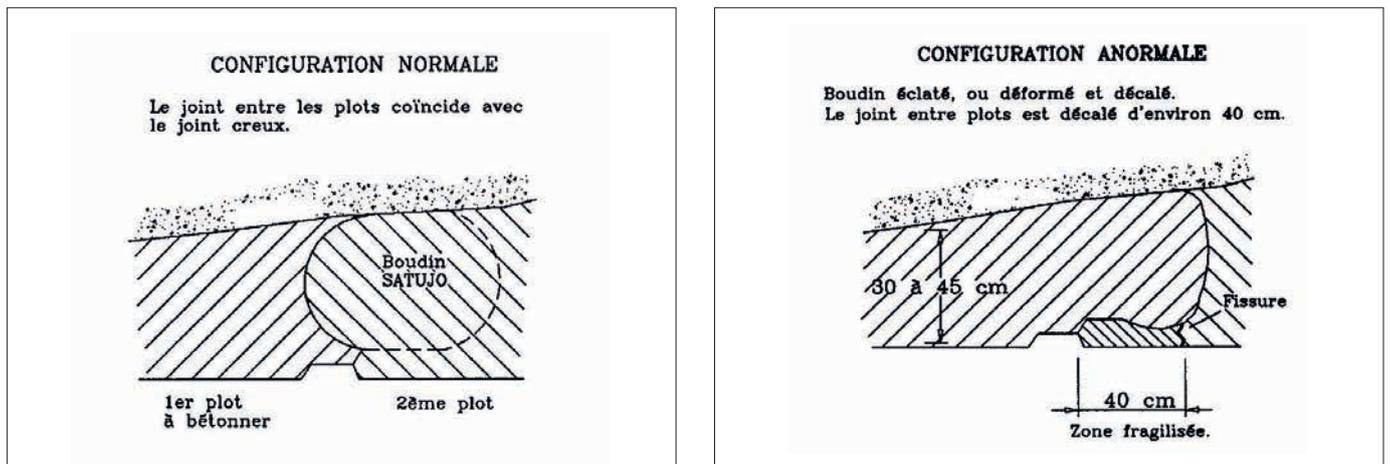


Figure 2 : désordres liés à la mauvaise tenue d'un coffrage gonflable lors de bétonnage

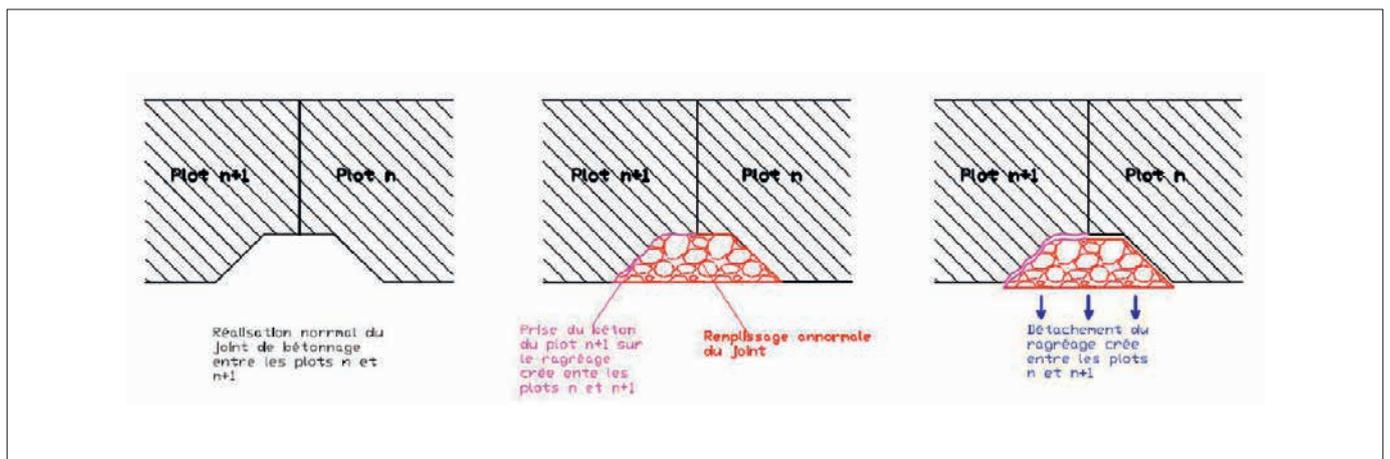


Figure 3 : cinématique de décollement d'un remplissage de joint sec avec un mortier de ciment



Figure 4 : désordres sur un joint sec  
[mouvement entre anneaux ou arrachement du béton au décoffrage]

DÉFAUTS D'ASPECT DES BÉTONS COFFRÉS	MO-5
<b>Description (aspect visuel du désordre)</b>	
Il s'agit de défauts altérant l'aspect, la teinte ou l'uni de surface de l'intrados.	
<b>Méthodes d'examen</b>	
Examen visuel Examen sonore (au marteau)	
<b>Paramètres à relever</b>	
Étendue – Surface – Localisation – Intensité	
<b>Désordres ou défauts associés à rechercher</b>	
Altération locale du béton (ségrégations, nids de cailloux) – Humidité – Zone sonnante creux – Fissures	
<b>Origines et causes possibles</b>	
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	
<b>Facteurs aggravants</b>	
Aucun (s'il n'y a pas de désordres ou défauts associés)	
<b>Conséquences, évolutions possibles</b>	
Aucune (sauf si les désordres associés sont évolutifs)	
<b>Dangers pour les usagers</b>	
Aucun danger	
<b>Risques pour les structures</b>	
Aucun (sauf si les désordres associés sont évolutifs)	
<b>Surveillance</b>	
Examen visuel Examen sonore	
<b>Remèdes</b>	
Aucun (sauf si les désordres associés sont évolutifs)	
<b>Observations</b>	

## Informations complémentaires

La plupart des défauts d'aspect des bétons coffrés sont la conséquence de malfaçons et de non-respect de règle de l'art lors du coffrage, du ferrailage, du bétonnage et du décoffrage. Ils ne sont pas considérés comme des désordres en tunnels. On citera pour mémoire :

- le bullage (ou soufflure),
- le faïençage,
- les nids de cailloux,
- le ressuage,
- le pommelage, les variations de teinte,
- les spectres d'armatures, les traces de rouille,
- les déformations localisées du coffrage.

Le document « Défauts d'aspects des parements en béton - Guide technique », édité par le Laboratoire régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand, donne les descriptions de ces défauts.

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



Figure 1 : déformation locale du coffrage



Figure 2 : faïençage dense



Figure 3 : ressuage



Figure 4 : réseau de fissures de peau

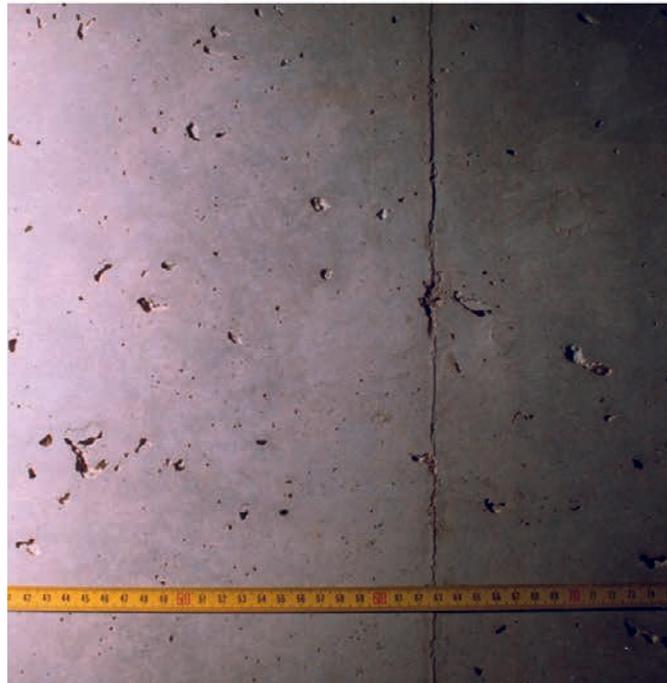


Figure 5 : bullage (ou soufflures)

## 2.10 DÉSORDRES DES ÉQUIPEMENTS DE GÉNIE CIVIL

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des tronçons non revêtus</b>	
Désordres sur les chaussées	EQ-1
Désordres des dalles et des cloisons	EQ-2

**DÉSORDRES SUR LES CHAUSSÉES****EQ-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Les désordres peuvent être de plusieurs types :

- faïençage et flaches avec remontées d'eau et de fines,
- fissures longitudinales ou transversales,
- bombements ou affaissements localisés.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel

**Paramètres à relever**

Localisation (PM, voie) – Surface affectée – Remontées d'eau visibles – Déformations de la couche de roulement

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Engorgement des drains ou des collecteurs – Fissuration anormale – Rupture dans les dispositifs de collecte des eaux – Tassement des fondations

**Origines et causes possible**

Concrétionnement des drains de chaussée par la calcite et mise en charge du réseau (le plus souvent) – Système de drainage défectueux ou mal dimensionné – Absence d'entretien du réseau d'assainissement

**Facteurs aggravants**

Terrain sensible à la dissolution ou au gonflement – Fortes charges d'eau dans le massif encaissant

**Conséquences, évolutions possibles**

Dégradation rapide des couches de chaussées (en particulier, la couche de roulement)

**Dangers pour les usagers**

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

**Risques pour les structures**

Risques d'accrochage d'équipements en calotte, de frottements ou de chocs au niveau des reins de la voûte par les poids-lourds (suite au roulis généré par les déformations de la chaussée)

**Surveillance**

Examen visuel (surveillance continue)

**Remèdes**

Réparation localisée  
Réfection complète de la chaussée avec drainage

**Observations**

## Informations complémentaires

Les chaussées des tunnels actuels peuvent être considérées comme étant sur-dimensionnées 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 aux tunnels. Certaines chaussées anciennes sont constituées de dalles de béton ; les contraintes de la circulation ont conduit rapidement à la rupture de ces dalles, sous l'action des vibrations, et les phénomènes de « pompage » ont rapidement dégradé les couches inférieures.

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 continuelles 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 liés à la dégradation de certains appuis (oxydation, éjection des joints sous l'effet du battement).



Figure 1 : faïençage et flaches [fondation saturée d'eau et comportant des zones de dissolution sous l'effet de pompage résultant du passage des véhicules]



Figure 2 : remontée d'eau au travers du béton bitumineux

## DÉSORDRES DES DALLES ET DES CLOISONS

EQ-2

### Description (aspect visuel du désordre)

Dalles (intrados et extrados) : Il s'agit de fissures de rupture dans les angles des dalles, fissures dans les zones de traction du béton.

Appuis : Des éclatements du béton ou des écailles apparaissent au droit des appuis ou au contact entre éléments jointifs (éléments préfabriqués).

Cloisons : Des fissures obliques de rupture peuvent se produire au contact de la voûte ou de la dalle ; la cloison peut aussi se fissurer au droit des suspentes.

Suspentes : Il s'agit principalement de corrosion (visible par des coulures de rouille).

### Méthodes d'examen

Examen visuel

Examen sonore (écailles)

### Paramètres à relever

Dalles : Localisation et formes des fissures (liées au ferrailage mais aussi à la forme des ouvertures pratiquées) – État et désordres des joints de dilatation et des joints secs – État et tenue des ragréages

Appuis : Localisation, surface et profondeur des éclatements (noter si c'est l'about de la dalle ou le chevêtre qui est affecté)

Cloisons : Position, ouverture et forme des fissures

Suspentes : Signes de corrosion des suspentes (coulures de rouille)

### Désordres ou défauts associés à rechercher

Présence de désordres dans le revêtement

### Origines et causes possibles

Dalles : Épaisseur du béton – Position et densité du ferrailage

Appuis : Points durs entre dalle et appui – Erreurs de pose (éléments préfabriqués) – Déformations thermiques des éléments

Cloisons : Points durs entre cloison et dalle/structure et appui (joint de dilatation insuffisant)

Suspentes : Venues d'eau

### Facteurs aggravants

Venues d'eau – Corrosion des suspentes ou des armatures – Appareils d'appui sous-dimensionnés

### Conséquences, évolutions possibles

Éclatement du béton suite à la corrosion des armatures

Pertes aérauliques

### Dangers pour les usagers

Dalles et appuis : Chute d'écailles sur les voies

Cloisons et suspentes : Aucun

### Risques pour les structures

Affaiblissements à long terme

Rupture des cloisons par surpression aéraulique (rare)

### Surveillance

Examen visuel

Examen sonore

## Remèdes

Passivation des armatures mises à nu (éclats ou écailles tombés)  
Réparation à adapter à la nature des matériaux et à la gravité des désordres

## Observations

## Informations complémentaires

### Dalle

Les termes plafond, faux-plafond et dalle sont utilisés indifféremment. Il s'agit de structures de second œuvre mises en place dans le 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 et longitudinaux incorporant souvent des dispositifs de protection contre le feu et d'étanchéité aéraulique.

Les éléments de plafond peuvent reposer sur des appuis (corbeaux ou engravures) par l'intermédiaire d'un appareil d'appui (néoprène ou polystyrène), destiné à permettre de légers déplacements. Ce joint peut bouger à la mise en place, créant un contact béton/béton. Il y a alors un risque d'écaillage de l'appui et de chutes d'écailles sur les trottoirs ou les voies (figures 1 et 2). 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 de type « Freyssinet », le béton de la dalle est en contact avec celui de l'appui mais cet assemblage joue le rôle de rotule qui autorise les légères déformations de la dalle.

Les épaufrures observées en about de dalle peuvent ne pas être dues à un déplacement des éléments ou à une mauvaise mise en œuvre des coffrages mais survenir au décoffrage de la dalle.

### Cloison

Les espaces réservés à la ventilation (gainés d'air frais, d'air vicié, de désenfumage) sont parfois cloisonnés. Ces cloisons minces peuvent être coulées en place (voiles armés) ou réalisées en panneaux préfabriqués ou moellons allégés.

En gainés 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 gainés 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 par des produits souples), des cassures locales en tête de cloison par adhérence au revêtement de voûte ou à la dalle de chaussée.



Figure 1 : écaïlle tombée sous une engravure



Figure 2a et 2b : épaufrures en about de dalles

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des tronçons non revêtus</b>	
Désordres dus aux incendies	IN-1

**DÉSORDRES DUS AUX INCENDIES****IN-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Ces désordres présentent une grande variété d'aspects, selon les types de revêtements, l'élévation de température et la durée d'exposition : variation de couleur du revêtement, faïençage, écaillage, éclatement, formation de cratères, fusion superficielle. Les désordres les plus intenses sont souvent situés en calotte où la température est la plus élevée.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel  
Examen sonore (auscultation au marteau)  
Mesures au scléromètre (caractérisation de la dureté de surface du béton)

**Paramètres à relever**

Localisation et extension des désordres – Couleur du revêtement – Dimensions et profondeur des zones écaillées ou des cratères  
– Dimensions des écailles ou des éclats

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Diminution des caractéristiques mécaniques (dans les sections adjacentes à la zone incendiée et apparemment indemnes) – Perte d'étanchéité du revêtement – Dysfonctionnement des drains

**Origines et causes possibles**

Incendie de véhicules – Augmentation de la température

**Facteurs aggravants**

Exposition à un feu de longue durée – Forte puissance de l'incendie (températures élevées) – Bétons à résistance élevée (écaillage plus important et plus rapide)

**Conséquences, évolutions possibles**

Diminution de résistance de la structure – Risques de report de contraintes liées à la juxtaposition de structures de rigidités différentes – Conséquences pouvant être très graves si le foyer n'est pas maîtrisé rapidement

**Dangers pour les usagers**

Après incendie, risques de chutes de débris lors du refroidissement de la voûte (en particulier sous les cratères et dans les zones écaillées)

**Risques pour les structures**

Affaiblissement des caractéristiques des matériaux et de l'épaisseur des revêtements, pouvant conduire à l'effondrement (ces risques pour la structure n'apparaissent que si l'incendie a présenté une puissance et une durée suffisantes)

**Surveillance**

Examen visuel  
Examen sonore  
État du revêtement resté en place (relevé des épaisseurs résiduelles, mesures au scléromètre, carottages...)

**Remèdes**

Mesures conservatoires éventuelles (mise sur cintres, boulonnages, forages de décharge de la pression hydrostatique)  
Réparation (selon l'épaisseur résiduelle) : soit rétablissement du revêtement par béton projeté et treillis soudé, après repiquage et sablage (ou hydrodémolition), soit démolition et coffrage d'un nouveau revêtement

**Observations**

Les désordres causés aux structures par les incendies en tunnels se présentent sous une grande multiplicité d'aspects, qui sont liés, d'une part aux types de revêtements affectés, d'autre part à la puissance du feu et à sa durée.

Si l'origine des désordres ne fait aucun doute dans les sections gravement endommagées qui font l'objet d'une observation avant d'être réparées, il peut y avoir un doute dans le cas d'ouvrages pour lesquels on ne dispose pas d'archives : si l'atteinte par un incendie ancien a été relativement modérée, ce qui n'a pas justifié de réparation ou de reconstruction, certaines dégradations affectant le revêtement (teinte modifiée, altération du matériau) ne peuvent trouver leur explication que par le recours à l'hypothèse de l'incendie.

Sans entrer dans les détails des mécanismes, sont présentés ci-après quelques-uns des aspects caractéristiques pris par des revêtements affectés par un incendie : la coloration, l'éclatement, l'écaillage, la diminution des caractéristiques mécaniques et la fusion.

### Coloration

La coloration des matériaux incendiés peut être caractéristique des températures atteintes et dépendre de la nature des constituants du béton.

### Éclatement et écaillage

Quand un béton est chauffé, deux phénomènes proches peuvent conduire à de la perte de matière : l'écaillage et l'éclatement. L'éclatement désigne le mécanisme par lequel les parements en béton perdent une partie de leur béton de surface. Il s'agit de morceaux de béton qui se détachent au cours de l'agression par le feu, souvent dans les zones les plus chauffées et les moins confinées, telles que, par exemple, les angles inférieurs de la retombée rectangulaire d'une poutre de plancher : on constate alors que des morceaux significatifs de section triangulaire se détachent, mettant à nu l'armature latérale du premier lit d'acier. Ces morceaux sont assez gros et peu nombreux. Ils résultent du détachement de la zone d'enrobage non armée située dans l'angle de section. Les morceaux détachés ne proviennent jamais du volume intérieur à la cage d'armature. Ils sont d'autant plus gros que l'enrobage des aciers est important.

L'écaillage consiste en un détachement progressif et continu de petits morceaux de béton qui sont expulsés avec force du parement exposé au feu. Ces morceaux ont la particularité d'être de faible épaisseur (quelques millimètres) et très aplatis (leurs dimensions perpendiculaires à l'épaisseur sont de l'ordre de quelques centimètres). Ces morceaux sont très nombreux et assimilables à des copeaux minces qui se détachent successivement en grand nombre et sur des surfaces très étendues en proportion de leur taille. La manifestation de ce phénomène peut commencer dès les premières minutes de l'incendie. Elle dépend de caractéristiques telles que la composition du béton et ses propriétés associées, sa teneur en eau et son état de contrainte. Dans certains cas, elle se poursuit continuellement tant que l'incendie n'est pas maîtrisé, à une vitesse quasi-constante. L'épaisseur de la pièce diminue donc progressivement, de façon proportionnelle au temps. La présence d'une cage d'armatures modifie le phénomène si les barres d'acier sont d'un diamètre tel qu'elles constituent un obstacle physique à l'expulsion du béton qu'elles masquent. Elles permettent alors de limiter le phénomène aux zones non masquées par les barres. En revanche, des aciers de petit diamètre espacés de plus d'une quinzaine de centimètres ne permettent pas d'escompter d'effet de ralentissement significatif de l'enlèvement progressif de matière.

### Diminution des caractéristiques mécaniques

L'augmentation de température s'accompagne de deux phénomènes : l'endommagement thermique, qui correspond à la perte irréversible de la rigidité élastique (module E) et la décohéation thermique, qui correspond à la chute irréversible de la résistance en compression. Ces endommagements peuvent être liés, à l'échelle microscopique, à l'expulsion de l'eau du béton. Ils débutent vers 100°C, et sont pratiquement totalement achevés entre 600 à 800°C. Le diagnostic sur le terrain se fait visuellement (couleur, aspect de terre cuite, faïençage) et à l'aide du marteau (la pointe pénètre aisément dans le matériau ayant perdu sa cohésion).

### Fusion

À partir d'une température variable selon les matériaux, il y a fonte superficielle du revêtement (ce phénomène a été observé au cours d'essais en four et très localement au tunnel du Mont-Blanc où la température a été évaluée à 1250°C).



Figure 1 : béton faïencé [limite thermique nette marquée par le dépôt ou non de la suie sur le faïençage], à une distance de 120 m du poids-lourd à l'origine du feu [sans autre véhicule], dans le tunnel du Mont-Blanc



Figure 2 : cratères de 30 à 60 cm de profondeur creusés dans la voûte par l'incendie, au droit du poids-lourd à l'origine du feu [tunnel du Mont-Blanc]



Figure 3 : écaillage profond ayant dégagé les armatures d'intrados [dans la zone la plus touchée, au cœur de l'incendie de 1996, la dégradation a localement atteint le mortier de bourrage], suite à l'incendie d'une navette de poids-lourds, pendant une dizaine d'heures, dans un tunnel formé de voussoirs préfabriqués en béton armé [tunnel sous la Manche]

## 2.12 DÉSORDRES LIÉS À DES DÉFAUTS D'ENTRETIEN

Liste des désordres	Numéro de fiche
<b>Désordres des tronçons non revêtus</b>	
Défauts d'entretien	EN-1

**DÉFAUTS D'ENTRETIEN****EN-1****Description (aspect visuel du désordre)**

Cette fiche regroupe tous les désordres qui n'affectent pas la structure de l'ouvrage mais qui jouent un rôle dans l'exploitation d'un tunnel et qui peuvent dans certains cas présenter un risque pour l'usager.

Ces désordres sont variés et peuvent être situés dans différentes zones de l'ouvrage.

**Méthodes d'examen**

Examen visuel

**Paramètres à relever**

Localisation

**Désordres ou défauts associés à rechercher**

Aucun

**Origines et causes possibles**

Défaut d'entretien ou de mise en place – Dégradations liées au temps

**Facteurs aggravants**

Absence d'entretien régulier

**Conséquences, évolutions possibles**

Aggravation des désordres – Gêne à l'exploitation – Risque d'incidents de circulation

**Dangers pour les usagers**

Dangers possibles selon l'importance du désordre (chutes d'éléments ou d'équipements sur la chaussée, présence d'eau et/ou d'obstacles sur la chaussée)

**Risques pour les structures**

Engorgement des système d'assainissement – Dégradation des têtes par la végétation

**Surveillance**

Examen visuel

**Remèdes**

Effectuer des contrôles réguliers (patrouillage) dans l'ouvrage et sur ses abords  
 Surveillance continue (vérification systématique de tous les équipements ou aménagements dans et autour de l'ouvrage pouvant, s'ils sont mal entretenus ou en mauvais état, devenir un risque pour l'usager)  
 Contrôle annuel  
 Maintenance des équipements et entretien courant des structures

**Observations**

Ces désordres affectent directement l'exploitation de l'ouvrage et, quelquefois, la sécurité des usagers. Ils doivent être relevés et cités sur les rapports de contrôle et d'inspection. Bien souvent, ces désordres sont dus à un défaut d'entretien : il est donc important de les noter dans la partie « suites à donner » du rapport d'inspection et de contrôler leur évolution lors de l'inspection suivante.

## Informations complémentaires

Les désordres regroupés dans cette fiche sont divers et variés. Il peut en exister d'autres mais tous ont en commun une absence d'entretien courant de la structure.

Par exemple, les désordres suivants peuvent exister sur des dispositifs d'équipements et les zones d'influence proches de l'ouvrage :

- végétation dense pouvant créer des instabilités aux têtes,
- objets pouvant tomber sur la chaussée,
- défauts de fixation (suspentes de chemin de câble, caméras, câbles d'alimentation en calotte),
- tampons ou grilles en fonte absents ou faisant obstacle à la circulation.

Ces désordres peuvent être évités en adoptant une démarche de prévention des risques liés à l'exploitation.



Figure 1a et 1b : végétation dense pouvant créer des instabilités aux têtes – Objets pouvant tomber sur la chaussée



Figure 2a et 2b : fixations de suspente de chemin de câble ou de caméra sectionnées partiellement ou totalement



Figure 2c : attache plastique d'un câble d'alimentation cassée en calotte



Figure 3 : grille mal positionnée et engorgement du caniveau

**ONT CONTRIBUÉ À LA RÉDACTION DE CE DOCUMENT :**  
**F. SPATARO, C. BOULOGNE, V. ROBERT, S. FRACHON, C. LARIVE,**  
**J. KASPERSKI, Y. PERU, D. SUBRIN, A. ROBERT**

**MERCI ÉGALEMENT AUX NOMBREUX RELECTEURS**



**Centre d'Études des Tunnels**

25 avenue François Mitterrand  
Case n°1

69674 BRON - FRANCE

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

[cetu@developpement-durable.gouv.fr](mailto:cetu@developpement-durable.gouv.fr)

