

GUIDE DE L'INSPECTION DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS ROUTIERS

*LIVRE 1 : DU DÉSORDRÉ À L'ANALYSE,
DE L'ANALYSE À LA COTATION*



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 1 : DU DÉSORDRE À L'ANALYSE,
DE L'ANALYSE À LA COTATION*

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

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1. Avant-propos	9
2. Généralités	11
2.1. Domaine d'application	11
2.2. Contenu	11
2.3. Pourquoi inspecter les tunnels creusés ?	12
2.4. Le contexte réglementaire	12
2.5. Les actions de surveillance	13
2.6. Surveillance renforcée et haute surveillance	14
2.6.1. Surveillance renforcée	14
2.6.2. Haute surveillance	14
2.7. Les intervenants	14
2.7.1. Le maître d'ouvrage constructeur	14
2.7.2. Le maître d'ouvrage gestionnaire	14
2.7.3. L'équipe d'inspection	15
2.8. Les conditions de sécurité	16
3. Définitions	17
3.1. Qu'est-ce qu'un tunnel ?	17
3.2. Spécificités des tunnels routiers	17
3.3. Les différents éléments constitutifs d'un tube	18
3.3.1. Les têtes	18
3.3.2. Ouvrages connexes	19
3.3.3. La section courante	20
4. Les désordres	25
4.1. Introduction	25
4.2. Terminologie	26
4.2.1. Définitions proposées dans le cadre des inspections	26
4.2.2. Termes liés aux manifestations de l'eau	27
4.3. Catalogue des désordres	28
4.3.1. Liste des désordres	28
4.3.2. Fiche-type de désordre	30
5. Facteurs de désordres	31
5.1. Facteurs liés aux conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques	31
5.1.1. Caractéristiques géologiques et géotechniques du massif encaissant	32
5.1.2. Caractéristiques hydrogéologiques	33
5.1.3. Causes environnementales	33
5.2. Facteurs liés à la construction	34
5.2.1. Conception	34
5.2.2. Réalisation	35
5.2.3. Nature des matériaux	35
5.3. Facteurs liés à la vie de l'ouvrage	36
5.3.1. Actions chimiques	36
5.3.2. Trafic	37
5.3.3. Surveillance et entretien	38
5.4. Tableau récapitulatif	39

6. L'analyse des désordres	41
6.1. Pré-diagnostic	41
6.2. Identification des pathologies et de leurs évolutions	41
6.3. Diagnostic final	42
6.4. Cadres schématiques pour l'analyse des désordres	43
6.4.1. Cas des excavations non revêtues	43
6.4.2. Cas des excavations revêtues	45
6.5. Exemple d'analyse de désordres, de diagnostic et de réparations	49
6.5.1. Présentation de l'ouvrage	49
6.5.2. Investigations et auscultation	49
6.5.3. Diagnostic	50
6.5.4. Projet de réfection	50
6.5.5. Travaux	50
6.5.6. Conclusion	50
7. Comment conduire une inspection détaillée	51
7.1. Comment préparer l'inspection	51
7.1.1. Programmation	51
7.1.2. Étude des documents existants	51
7.1.3. Travaux préparatoires	52
7.2. Comment réaliser l'inspection	52
7.2.1. Les moyens, les outils	52
7.2.2. La méthode d'inspection	55
7.2.3. Le travail de bureau	57
8. L'évaluation IQOA	59
8.1. Principe d'évaluation	59
8.2. Découpage	59
8.2.1. Tubes	59
8.2.2. Tronçons	59
8.2.3. Zones	60
8.2.4. Parties et sous-parties pour le génie civil	60
8.2.5. Parties et sous-parties pour l'eau	61
8.3. Principes de cotation	62
8.3.1. Classes d'état d'une zone	62
8.3.2. Tableau récapitulatif des notes IQOA	64
8.3.3. Cotation « Génie civil »	64
8.3.4. Cotation « Eau »	64
8.3.5. Première agrégation des notes IQOA par partie constitutive	64
8.3.6. Seconde agrégation et synthèse des cotations	65
9. Bibliographie	67
9.1. Instructions	67
9.2. Guides et recommandations	67
9.3. Sites internet	68

TABLE DES MATIÈRES

10. Annexes	69
10.1. Annexe 1 : Logigramme d'organisation de la surveillance du génie civil des tunnels	69
10.2. Annexe 2 : Modalités d'intervention – Éléments d'un cahier des clauses techniques particulières types pour une inspection détaillée (ID) de tunnel	70
10.2.1. Travaux préliminaires à réaliser par le maître d'ouvrage gestionnaire	70
10.2.2. Équipe d'inspection	70
10.2.3. Préparation de l'intervention	70
10.2.4. Intervention in-situ	71
10.2.5. Réunion-bilan	71
10.2.6. Réalisation des levés des désordres	71
10.2.7. Rédaction du rapport d'inspection détaillée	71
10.2.8. Réunion de conclusion	72
10.2.9. Exemple d'application à un tunnel creusé et revêtu en béton	72
10.3. Annexe 3 : Conditions de sécurité à respecter lors des actions de surveillance et d'entretien programmées – Difficultés spécifiques d'intervention	83
10.3.1. Préambule	83
10.3.2. Les risques d'accidents du travail – La réglementation	83
10.3.3. Dispositions particulières – Mesures de sécurité	83
10.3.4. Plan de prévention-type	85
10.3.5. Les risques et leurs moyens de prévention	86
10.4. Annexe 4 : Profils en travers caractéristiques au fil des époques	87
10.5. Annexe 5 : Fonctionnement d'un revêtement de tunnel	90
10.5.1. Spécificité des revêtements de tunnel	90
10.5.2. Les situations génératrices de désordres	90
10.5.3. Les mesures	91
10.6. Annexe 6 : Analyses et caractérisations des matériaux	92
10.6.1. Analyse des eaux	92
10.6.2. Analyse de la composition des mortiers et bétons	93
10.6.3. Essais sur les bétons	93
10.6.4. Autres tests in situ	93
10.7. Annexe 7 : Techniques d'investigation et essais complémentaires	94
10.7.1. Fissurométrie (1)	94
10.7.2. Mesures de convergences (1, 2, 3)	94
10.7.3. Nivellement (1, 2, 3)	95
10.7.4. Mesures de déformation du revêtement par extensométrie (1)	95
10.7.5. Profilométrie par station ou en continu (1, 2, 3)	95
10.7.6. Radar géophysique (2, 3)	96
10.7.7. Scanner par laser continu en lumière visible (1, 2, 3)	96
10.7.8. Scanner par laser continu en thermographie (1, 2, 3)	97
10.7.9. Analyses de mortiers et bétons (2, 3)	97
10.7.10. Analyses d'eau (2, 3)	97
10.7.11. Mesures de pression (2, 3)	97
10.7.12. Sondages destructifs ou carottés (2, 3)	98
10.7.13. Fenêtres (2, 3)	98
10.7.14. Tranchées (2, 3)	98
10.7.15. Essais mécaniques sur échantillons (2, 3)	98
10.7.16. Mesures de contraintes (2, 3)	98
10.7.17. Autres reconnaissances	98

10.8. Annexe 8 : Principe de tronçonnage	99
10.8.1. Tubes	99
10.8.2. Tronçons	99
10.8.3. Elaboration du document synoptique	99
10.8.4. Tronçonnage – Exemple	100
10.9. Annexe 9 : Marquage d'un tunnel	101
10.9.1. But du marquage	101
10.9.2. Origine du marquage	101
10.9.3. Pérennité du marquage	101
10.9.4. Nature des plaques	102
10.9.5. Fixation des plaques	102
10.10. Annexe 10 : Cadre de constat de contrôle annuel	103
10.11. Annexe 11 : Conception et codification des levés d'intrados	104
10.11.1. Le report des observations	104
10.11.2. La forme des levés d'intrados	104
10.11.3. Conventions, symboles et figures utilisés dans les levés d'intrados	104
10.12. Annexe 12 : Cadre type de rapport d'inspection détaillée (ID)	109
10.13. Annexe 13 : Exemple de cotation IQOA d'un tunnel	113
10.13.1. Étape 1 : Etablissement du tronçonnage – Exemple	113
10.13.2. Étape 2 : Partition des tronçons – Exemple	113
10.13.3. Étape 3 : Inspection détaillée (voir chapitre 6)	113
10.13.4. Étape 4 (facultative) : Synthèse des désordres – Exemple	114
10.13.5. Étape 5 : Cotation des sous-parties et des parties – Première et seconde agrégation des notes IQOA	114
10.13.6. Étape 6 : Synthèse des notes IQOA	115
10.14. Annexe 14 : Nature et cotation des désordres – Zone d'influence	116
10.15. Annexe 15 : Nature et cotation des désordres – Équipements de génie civil	117



AVANT-PROPOS

Le présent guide est destiné en premier lieu aux personnes chargées de réaliser les inspections détaillées du génie civil des tunnels routiers creusés. Il s'adresse également aux maîtres d'ouvrages gestionnaires de ces ouvrages qui, à des degrés divers, participent à l'organisation et à l'exploitation des actions de surveillance.

Ce guide méthodologique sert de référence pour les inspections des tunnels du réseau routier national non concédé (RRN-NC) mais peut aussi être utilisé par tout autre maître d'ouvrage en charge de structures du même type : sociétés concessionnaires, collectivités territoriales, établissements publics...

Dans ce but, le livre 1 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 définit également l'inspection comme l'outil de base d'une politique de surveillance efficace des ouvrages.

Le livre 2, constituant la seconde partie de ce guide, regroupe sous forme de catalogue l'ensemble des désordres susceptibles d'être constatés dans les ouvrages et permet ainsi aux inspecteurs de disposer de fiches pratiques à utiliser.

Ce guide est élaboré et publié par le Centre d'études des tunnels (CETU) dont l'une des missions depuis 1974 est l'inspection des tunnels du réseau routier national non concédé. Les nombreux dossiers étudiés renferment des données d'une 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 des ouvrages) et par la diversité des désordres qui y sont décrits et photographiés. Ils permettent d'alimenter le document par de multiples cas concrets. C'est toute l'expérience accumulée depuis le début des inspections de tunnels que ce guide permet de partager.



2.1 DOMAINE D'APPLICATION

Au sens du code de la voirie routière, un tunnel désigne toute route ou chaussée située sous un ouvrage de couverture qui, quel que soit son mode de construction, crée un espace confiné. Une section de route ou de chaussée située sous un ouvrage de couverture n'est pas un espace confiné dès lors que l'ouvrage de couverture comporte des ouvertures vers l'extérieur dont la surface est égale ou supérieure à un mètre carré par voie de circulation et par mètre de chaussée.

Le présent guide restreint son champ d'application au génie civil des tunnels creusés et exclut les tranchées couvertes, dont les méthodes d'inspection et de cotation font l'objet de guides édités par le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA).

2.2 CONTENU

Ce guide situe les inspections dans leur contexte, recommande les niveaux de qualification nécessaires des personnels constituant l'équipe d'inspection et indique les équipements et moyens qui permettent le bon déroulement des inspections.

Puis il définit les divers éléments structurels constituant un tunnel ainsi que les termes spécifiques à l'ouvrage et à la route qu'il recouvre. Il donne les définitions, aussi précises que possible, des désordres les plus courants que l'on peut relever en tunnel qu'il soit revêtu de maçonnerie, de béton ou encore non-revêtu. Cette terminologie est essentielle pour parfaire la formation des inspecteurs et permet de décrire, avec un vocabulaire commun, les nombreuses « particularités » que l'on peut rencontrer dans les ouvrages.

Ce guide présente aussi des éléments pour analyser les désordres relevés au cours de l'inspection. À partir de l'identification d'un désordre particulier et de son importance, il propose une aide pour évaluer l'état de la structure du tunnel dans une zone que l'inspecteur définit à partir des constats sur site et de l'étude des documents de récolement de l'ouvrage. L'inspecteur peut ainsi établir une priorité parmi les désordres, au vu de leur gravité, et préconiser les actions de surveillance, d'entretien ou de réparation à mettre en œuvre.

En se positionnant à portée de main de la structure du tunnel, la méthode d'inspection développée dans ce guide est visuelle et sonore. Cette méthode non destructive permet une bonne évaluation de l'état des ouvrages mais n'empêche pas l'inspecteur de demander la mise en œuvre d'autres moyens d'analyse pour l'aider à faire le « bilan de santé » de tout ou partie de l'ouvrage. Il faut cependant garder à l'esprit que tous ces moyens complètent mais ne remplacent pas l'inspection.

Enfin, le guide propose une méthode de cotation « Image Qualité des Ouvrages d'Art » pour les tunnels (IQOA – Tunnels). Elle a pour but de fournir deux indicateurs, l'un portant sur l'état du génie civil et l'autre portant sur la présence d'eau, qui permettent de classer des zones. Cette méthode de cotation s'inscrit dans le processus d'évaluation périodique de l'état des ouvrages d'art fixé par l'Instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEO).

Le catalogue des désordres, qui constitue le livre 2 de ce guide, est présenté dans le chapitre 4. Fort logiquement, comme les ouvrages anciens posent beaucoup plus de problèmes, les données concernant leurs désordres y sont plus nombreuses.

2.3 POURQUOI INSPECTER LES TUNNELS CREUSÉS ?

Les tunnels routiers sont construits afin de permettre le passage de la circulation des véhicules dans de bonnes conditions de sécurité et de confort. Or, comme tous les ouvrages d'art, ils sont soumis à un vieillissement et des évolutions qui peuvent mettre en péril leur stabilité, leurs fonctionnalités, la sécurité des usagers ou le niveau de service assuré.

Selon l'âge du tunnel (et donc les méthodes utilisées à l'époque de la construction, mais aussi les évolutions survenues depuis cette époque), les désordres constatés sont différents.

Le point commun à tous les tunnels tient au fait que leur comportement est directement influencé par celui du terrain

dans lequel ils ont été creusés, car le massif rocheux fait vraiment partie intégrante de l'ouvrage en imposant souvent le rythme et l'intensité des évolutions. Les venues d'eau sont aussi la cause de nombreux désordres et constituent une gêne à l'exploitation.

Les évolutions sont presque toujours prévisibles sur des échelles de temps de quelques années. La prévision se fonde, d'une part sur la connaissance générale des désordres et des pathologies susceptibles d'être rencontrés et, d'autre part sur l'inspection détaillée périodique des ouvrages.

2.4 LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

L'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) précise les obligations des gestionnaires en matière de surveillance, d'entretien et de réparation.

La nouvelle ITSEOA de décembre 2010, qui remplace celle publiée en octobre 1979 et modifiée en décembre 1995, est constituée du Fascicule 0 « Dispositions générales applicables à tous les ouvrages d'art » et de trois fascicules d'application :

- le Fascicule 1 : Dossier d'ouvrage,
- le Fascicule 2 : Généralités sur la surveillance,
- le Fascicule 3 : Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiates ou de sauvegarde.

Les autres fascicules qui constituaient la seconde partie de l'ITSEOA de 1979, dont le Fascicule 40 « Tunnels – Tranchées couvertes – Galeries de protection », ne font plus partie intégrante de l'ITSEOA et sont désormais devenus des guides techniques.

Le nouveau Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements » publié en octobre 2012 présente les dispositions particulières pour la surveillance et l'entretien des tunnels creusés, tranchées couvertes et ouvrages routiers similaires. Destiné aux maîtres d'ouvrage en charge de l'exploitation, de l'entretien et de la gestion du réseau routier national non concédé (RRN-NC), il peut aussi servir de référence à tout maître d'ouvrage en charge d'une structure du même type.

Il aborde deux domaines : le génie civil et les équipements d'exploitation et de sécurité. Il contient des éléments relatifs :

- à l'inspection, l'entretien et la surveillance du génie civil des ouvrages (causes et nature des désordres, moyens de reconnaissance et d'auscultation),
- à la maintenance et aux contrôles des équipements de sécurité et d'exploitation,
- aux travaux de réparation.

Le présent guide détaille la méthode de réalisation des inspections initiale ou périodique du génie civil des tunnels creusés et d'exploitation de leur résultats. Le chapitre 8 détaille la démarche d'évaluation « Image qualité des ouvrages d'art » (IQOA) propre aux tunnels par une cotation de l'état du génie civil et de la présence d'eau. Ce guide est le complément à vocation opérationnelle auquel renvoie le Fascicule 40 pour la partie génie civil.

L'état et les performances des équipements d'exploitation et de sécurité font également l'objet d'une cotation dont la méthode est proche de la démarche IQOA adoptée pour les structures. Son principe est abordé dans le Fascicule 40 et détaillé dans ses annexes d'application accessibles sur le site Internet du Centre d'études des tunnels (www.cetu.developpement-durable.gouv.fr).

2.5 LES ACTIONS DE SURVEILLANCE

La surveillance d'un ouvrage d'art est l'ensemble des contrôles et inspections révélateurs de son état et de son évolution possible à partir d'un état de référence. Certaines actions sont continues, d'autres périodiques et d'autres encore ponctuelles, liées à des événements particuliers de la vie de l'ouvrage :

Les actions continues font l'objet du relevé permanent d'événements.

Les actions périodiques sont :

- les contrôles annuels,
- les visites d'évaluation,
- les inspections détaillées périodiques (IDP),
- les inspections détaillées de parties d'ouvrages.

Les actions ponctuelles regroupent :

- les inspections détaillées initiales (IDI),
- les inspections spécifiques de fin de garanties contractuelles,
- les actions liées à des événements imprévus.

L'inspection détaillée initiale définit un état de référence à partir duquel les autres actions de surveillance permettent d'apprécier son évolution. Cette inspection a lieu :

- en fin de construction de la structure de l'ouvrage, éventuellement avant la mise en place des équipements de sécurité et d'exploitation ;
- après des travaux de réparation importants ou des modifications substantielles apportées à l'ouvrage ;
- en vue de la prise en charge de la gestion d'un ouvrage par un nouveau maître d'ouvrage, si le dossier d'ouvrage ne contient pas de compte-rendu d'examen récent.

L'inspection détaillée périodique constitue en quelque sorte un « bilan de santé » complet de l'ouvrage. Il s'agit d'un examen visuel et sonore (par l'utilisation d'un marteau de géologue) qui peut, le cas échéant, être complété par des auscultations et des mesures. L'inspection peut aussi être approfondie par des contrôles non destructifs (mesures soniques ou ultrasoniques, thermographie infrarouge, mesures radar...) ou destructifs (carottages, fenêtres...). Sa consistance est fonction de la nature, de l'importance et de l'état de l'ouvrage, mais l'ensemble de ses parties doit obligatoirement être examiné.

Cette inspection a normalement lieu tous les six ans. Toutefois, le maître d'ouvrage gestionnaire peut, en le justifiant, déroger à cette règle en portant la périodicité à neuf ans pour les ouvrages robustes ou, à l'inverse, en la réduisant à trois, deux ou même un an pour les ouvrages particulièrement vulnérables ou présentant des désordres significatifs. L'annexe 1 présente un logigramme illustrant l'organisation de la surveillance d'un tunnel. Dans ce logigramme figurent également des visites ou inspections détaillées particulières prévues par le Fascicule 40 et correspondant aux événements de la vie de l'ouvrage détaillés ci-après.

Certaines parties d'ouvrages importantes ne peuvent pas être examinées avec des moyens « classiques » d'inspection. Elles font alors l'objet d'une inspection détaillée spécifique qui peut être faite soit à l'occasion d'une inspection détaillée périodique, soit à un autre moment. Si la surveillance continue et les contrôles annuels ne mettent pas en évidence de dysfonctionnement, ces parties peuvent être examinées lors d'une inspection sur deux.

Avant l'expiration de chaque délai de garantie ou de responsabilité (garanties particulières au sens du Cahier des clauses administratives générales ou responsabilité décennale), l'ouvrage ou les parties d'ouvrage concernées font l'objet d'une inspection spécifique dont l'objectif est de vérifier leur état. Ces inspections doivent être effectuées assez tôt avant l'expiration des délais afin de pouvoir faire jouer les garanties ou responsabilité si nécessaire. Le logigramme présenté en annexe 1 les prévoit ; cependant, compte tenu des délais des diverses garanties (sur les structures, sur les équipements de génie civil...) qui peuvent être appliquées lors d'un marché de construction de tunnel, aucune date ne peut être précisément fixée. Les maîtres d'ouvrage constructeurs et gestionnaires sont donc invités à prendre connaissance des différentes garanties qui concernent leur ouvrage, à en suivre attentivement l'application et à faire réaliser les inspections spécifiques aux moments opportuns.

À la suite de circonstances particulières susceptibles d'avoir endommagé un ouvrage ou lorsqu'une anomalie grave a été décelée, une inspection détaillée exceptionnelle, pouvant porter seulement sur une ou plusieurs parties de l'ouvrage, doit être organisée.

2.6 SURVEILLANCE RENFORCÉE ET HAUTE SURVEILLANCE

Les modalités de ces surveillances sont précisées dans le fascicule d'application de l'ITSEOA traitant la surveillance renforcée et la haute surveillance (Fascicule 3).

2.6.1 Surveillance renforcée

Lorsque l'état d'un ouvrage le justifie ou en cas d'incertitude sur l'origine, la nature et la cause des désordres ou lorsque l'ouvrage a un caractère innovant ou exceptionnel, le maître d'ouvrage gestionnaire peut décider de le soumettre à une surveillance renforcée, plus intense que la surveillance définie précédemment.

Deux cas sont à distinguer :

- les ouvrages exceptionnels ou à caractère innovant qui ont fait l'objet dès leur construction d'une instrumentation spécifique qu'il convient de suivre et d'exploiter : dans ce cas, l'ouvrage est dès l'origine sous surveillance renforcée ; les résultats des contrôles effectués peuvent permettre ultérieurement de suivre l'ouvrage par des inspections détaillées classiques ;
- les ouvrages pour lesquels il existe des doutes sur l'évolution des désordres : dans ce cas, le maître d'ouvrage gestionnaire peut placer l'ouvrage sous surveillance renforcée en définissant les principes de celle-ci.

2.6.2 Haute surveillance

Lorsque des désordres constatés sur un ouvrage paraissent susceptibles de mettre en cause la sécurité ou la tenue de l'ouvrage, le maître d'ouvrage gestionnaire peut décider de le placer sous haute surveillance. Cela permet, en cas de danger imminent, le déclenchement immédiat par les autorités compétentes des actions nécessaires pour assurer la sécurité.

La mise sous haute surveillance s'applique uniquement à un ouvrage en état défectueux. C'est une mesure d'exception qui consiste à guetter l'apparition d'un signe faisant craindre la possibilité de défaillance à très court terme, afin de prendre immédiatement les mesures nécessaires et préalablement définies.

La mise sous haute surveillance d'un ouvrage est accompagnée d'une évaluation des capacités de résistance de sa structure pour déterminer les seuils d'alerte qui doivent être définis dans le cadre de cette procédure.

2.7 LES INTERVENANTS

Conformément à l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art, les différents intervenants dans une visite d'inspection et leur rôle sont définis ci-après.

2.7.1 Le maître d'ouvrage constructeur

Dans le cas des tunnels neufs, le maître d'ouvrage constructeur a l'initiative de l'inspection détaillée initiale (IDI), avec la participation du futur gestionnaire ; l'IDI a lieu, dans la mesure du possible, avant la mise en service.

2.7.2 Le maître d'ouvrage gestionnaire

Définis dans le fascicule de l'ITSEOA portant sur les dispositions applicables à tous les ouvrages (fascicule 0), les services du maître d'ouvrage gestionnaire comprennent trois niveaux,

le niveau décisionnel, le niveau organisationnel et le niveau opérationnel.

Le niveau décisionnel

Le niveau décisionnel est constitué par la direction de la maîtrise d'ouvrage gestionnaire. Il est le garant de la politique de gestion de son patrimoine, ce qui le conduit à :

- décliner la politique définie dans l'ITSEOA, en tenant compte des contraintes liées à l'exploitation et, prioritairement, à la sécurité des personnes ;
- fixer les objectifs et prévoir les moyens humains et financiers nécessaires à leur réalisation en les adaptant à la valeur et l'importance de son patrimoine ;
- prioriser les actions d'entretien et de réparation à partir d'une analyse intégrant, en particulier, les priorités techniques, la logique d'itinéraire, les contraintes d'exploitation, la gêne à l'utilisateur ;
- s'assurer de leur mise en œuvre en mettant en place un contrôle efficace.

Il n'intervient pas dans l'organisation et le déroulement de l'inspection.

Le niveau organisationnel

Le niveau organisationnel propose une planification des inspections, une périodicité d'intervention, ainsi que le phasage en fonction de l'importance de l'ouvrage. Il participe à la préparation de l'inspection en mettant à disposition de l'équipe d'inspection les documents nécessaires à l'intervention et en fournissant, au besoin, des moyens d'interventions particuliers.

Il peut organiser, à la fin de chaque visite sur le site, une réunion avec l'équipe d'inspection pour un premier bilan sur l'état de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage, concerné par l'inspection.

Il exploite les divers rapports liés aux inspections (rapports internes ou rapports de spécialistes) et analyse les désordres structurels et les défauts d'équipements pour juger de leur gravité et en tirer les conséquences pour les actions d'entretien urgentes, pour les actions techniques, ainsi que pour la sécurité.

Dans les cas complexes, il prend l'avis de spécialistes et fait procéder éventuellement à des investigations supplémentaires.

Le niveau opérationnel

Le niveau opérationnel a pour mission d'intervenir sur les ouvrages pour réaliser ou contrôler les opérations de surveillance, d'entretien ou de réparation. Il organise également les mesures relatives à l'exploitation (restriction de circulation, signalisation temporaire, ouverture des voies d'accès, arrêt de la ventilation, accès aux galeries ou gaines de ventilation, ...) afin d'en permettre le bon déroulement et assurer la sécurité des personnes.

Il réalise les contrôles annuels, organise ou réalise l'entretien courant et il rend compte de ces actions. Il peut également assurer le suivi de certaines opérations d'entretien spécialisé.

Il assure la surveillance continue, notamment en établissant et en tenant un relevé permanent d'événements qui constitue une sorte de main-courante concernant le génie civil.

À la suite de circonstances particulières, susceptibles d'avoir endommagé des ouvrages (chocs, séismes, ...), il peut effectuer ou faire effectuer des visites ou inspections exceptionnelles.

Toutes les interventions pratiquées sur le terrain doivent se traduire par un constat écrit et daté. Ce constat doit faire l'objet d'un suivi ultérieur quand il conduit à prescrire des actions spécifiques. La synthèse de ces interventions et des opérations de surveillance remonte au niveau organisationnel.

2.7.3 L'équipe d'inspection

Les inspections détaillées des tunnels du réseau routier national non concédé sont réalisées par le Centre d'études des tunnels (CETU). Elles peuvent exceptionnellement être réalisées par des bureaux d'études spécialisés en pathologie des tunnels.

En dehors du réseau routier national non concédé, les inspections détaillées peuvent être réalisées par un service intégré du maître d'ouvrage, s'il dispose des compétences nécessaires, ou par des bureaux d'études spécialisés. Dans ce cas, le choix du bureau d'études se fait par consultation sur la base d'un cahier des charges spécifique. L'annexe 2 présente un exemple de cahier des clauses techniques particulières (CCTP) type pour la réalisation d'une inspection détaillée périodique.

Les propositions techniques des bureaux d'études doivent faire apparaître les qualifications et références des candidats pour ce type de prestation ainsi que les matériels qui seront employés.

Conformément à l'ITSEOA, l'ensemble de l'inspection détaillée doit être dirigée et exploitée par un agent qualifié de niveau ingénieur. Il a la responsabilité de la rédaction du rapport ainsi que des analyses et conclusions qu'il contient.

L'inspection doit être réalisée par des agents ayant des qualifications et expériences suffisantes dans le domaine du génie civil et des ouvrages d'art. Le personnel doit en outre avoir suivi une formation spécifique à l'inspection des tunnels. Les qualifications et expériences minimales suivantes sont recommandées :

- pour un agent d'inspection ou aide :
 - un an d'expérience en inspection et des connaissances en génie civil ;
- pour un inspecteur ou chargé d'études :
 - titulaire d'un diplôme équivalent de niveau IV¹ (baccalauréat...) : trois ans d'expérience en inspection et des connaissances en génie civil, géotechnique et pathologies des ouvrages d'art ;
 - titulaire d'un diplôme de niveau III (BTS, DUT...) dans le domaine du génie civil : un an d'expérience, ainsi que des connaissances en géotechnique et pathologies des ouvrages d'art ;

1 : La nomenclature de référence est celle des niveaux de formation de la commission statistique nationale de la formation professionnelle et de la promotion sociale de mars 1969

- pour le responsable de l'équipe de constatation sur site :
 - titulaire d'un diplôme de niveau III (BTS, DUT...) dans le domaine du génie civil : trois ans d'expérience en inspection, ainsi que des connaissances en géotechnique et pathologies des ouvrages d'art ;
 - titulaire d'un diplôme d'ingénieur dans le domaine du génie civil : un an d'expérience en inspection ainsi que des connaissances en géotechnique et pathologies des ouvrages d'art ;
- pour le responsable d'inspection :
 - titulaire d'un diplôme d'ingénieur dans le domaine du génie civil : un an d'expérience en inspection ainsi que des connaissances en géotechnique et en pathologies des ouvrages d'art.

L'équipe d'inspection peut, en outre, intégrer des agents débutants bénéficiant d'un compagnonnage assuré par des agents expérimentés. L'agent débutant doit acquérir, par des formations, une bonne connaissance du comportement des structures et, par des interventions sur sites, une bonne expérience des désordres (leurs aspects visuels, leurs causes, les évolutions possibles). Au terme du compagnonnage, l'agent doit pouvoir relever un désordre important et savoir faire le tri parmi les différentes informations qu'il a recueillies.

2.8 LES CONDITIONS DE SÉCURITÉ

La réglementation en matière de sécurité et de prévention de la santé ainsi que les dispositions particulières et mesures de sécurité à prendre pour les interventions en tunnels sont rappelées en annexe 3. Certaines dispositions peuvent éventuellement être adaptées aux modalités spécifiques d'intervention mises en place, pour chaque ouvrage, par les niveaux opérationnel et organisationnel du service gestionnaire.

On rappelle toutefois que le port des équipements de protection individuels (EPI) est toujours obligatoire. L'équipement habituel minimum (combinaison de travail et/ou gilet haute visibilité, chaussures de sécurité, gants) doit être complété par des lunettes lors des campagnes de purge des matériaux instables, des protections phoniques notamment si la circulation est partiellement maintenue, d'un casque avec jugulaire et d'un harnais anti-chute pour les travaux en nacelle.

Les inspections détaillées nécessitent souvent l'emploi d'une plateforme élévatrice mobile de personnes (ou nacelle). Ces engins doivent faire l'objet de vérifications générales périodiques (tous les 6 mois) effectuées par un organisme de contrôle agréé.

Les inspecteurs ou agents d'inspection qui manœuvrent ces engins doivent être titulaires d'une habilitation spécifique et personnelle (autorisation de conduite) délivrée par leur employeur. En plus du ou des utilisateurs de la nacelle, une personne doit être présente pour guider lors des manœuvres délicates et sécuriser l'environnement de travail de la nacelle.

DÉFINITIONS

3.1 QU'EST-CE QU'UN TUNNEL ?

On rappelle que, selon le nouveau fascicule 40, un tunnel est un espace confiné créé par un ouvrage de couverture, quel que soit son mode de construction. Cette définition est plus large que celle des documents antérieurs dans lesquels la notion de tunnel était restreinte aux seuls ouvrages creusés.

Cependant, du point de vue des services gestionnaires, le tunnel inclut l'ensemble des ouvrages attenants (stations de ventilation, immeuble, ...) en continuité du passage souterrain. Il est donc important, pour des tunnels complexes, de définir précisément les limites des différentes structures car leur inspection détaillée pourra faire appel à des spécialistes différents.

3.2 SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS ROUTIERS

Un *tunnel* se compose d'un ou de plusieurs *tubes* contenant chacun une ou plusieurs voies de circulation. Chaque tube comporte deux extrémités appelées *têtes*. Le tunnel peut aussi comporter des *galeries inter-tubes*.

Les tunnels routiers contiennent des aménagements destinés à assurer une exploitation sûre, la protection et l'évacuation des usagers en cas d'accident ou d'incendie, ainsi que l'intervention des services de secours.

Pour les tunnels de longueur inférieure à 300 m, ce sont au minimum des *niches de sécurité*.

Pour les tunnels plus longs, des *abris*, des *galeries d'évacuation* ou des *galeries de service* sont réalisés.

Suivant le type de ventilation adopté, certains tunnels sont pourvus de *gainés d'air frais* et de *gainés de désenfumage*. Ces gainés peuvent être situées au-dessus des voies et séparées de la partie circulée par une *dalle* (ou plafond), ou sous la chaussée.

Toutes ces structures entrent dans le champ de l'inspection détaillée.

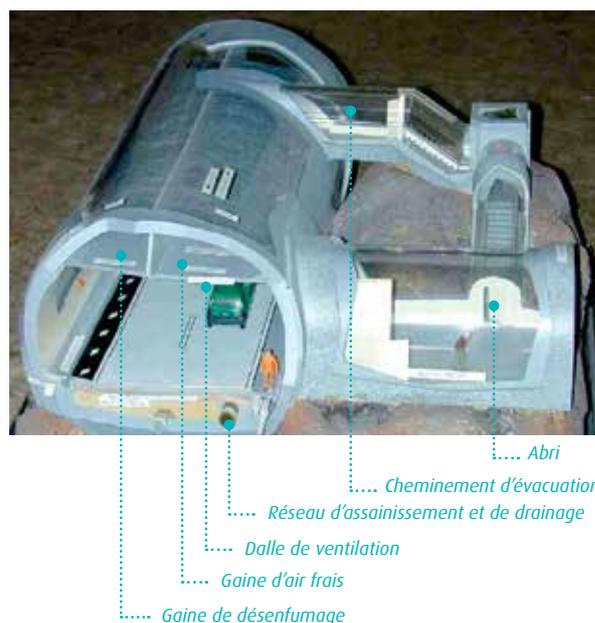


Figure 1 : vue éclatée de la composition d'un ouvrage

3.3 LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN TUBE

3.3.1 Les têtes

Ce terme a deux significations :

- spatiale : il désigne les points d'entrée en souterrain ou de sortie ;
- structurelle : il désigne aussi les ouvrages spécifiques qui peuvent être construits aux extrémités du tube creusé.

Tête « naturelle »

Dans de nombreux tunnels anciens, l'entrée en souterrain se fait directement dans le front rocheux. Bien que celui-ci ait été plus ou moins remanié lors du percement, il n'y a aucun aménagement construit au droit de l'entrée. Ces zones, souvent mal définies géométriquement, peuvent générer des dangers pour les usagers.



Figure 2 : tête naturelle

« Fausse » tête

Pour supprimer les dangers que peuvent présenter les têtes naturelles, des constructions particulières sont parfois édifiées aux entrées, afin de consolider le front rocheux et protéger les usagers contre les risques de chutes de pierres. Leur longueur à l'air libre est très variable, depuis le simple mur tympan plaqué au rocher jusqu'à la fausse tête de plusieurs mètres prolongée par des murs en ailes.

Les talus des tranchées d'accès aux tunnels ou aux tubes peuvent être revêtus (maçonnerie, béton) ou laissés bruts. Il en est de même de certains fronts rocheux dominant les entrées. Ils doivent être examinés dans les limites des moyens d'observation dont dispose l'inspecteur.

Au-delà, l'intervention d'une entreprise spécialisée peut être décidée par le service gestionnaire.

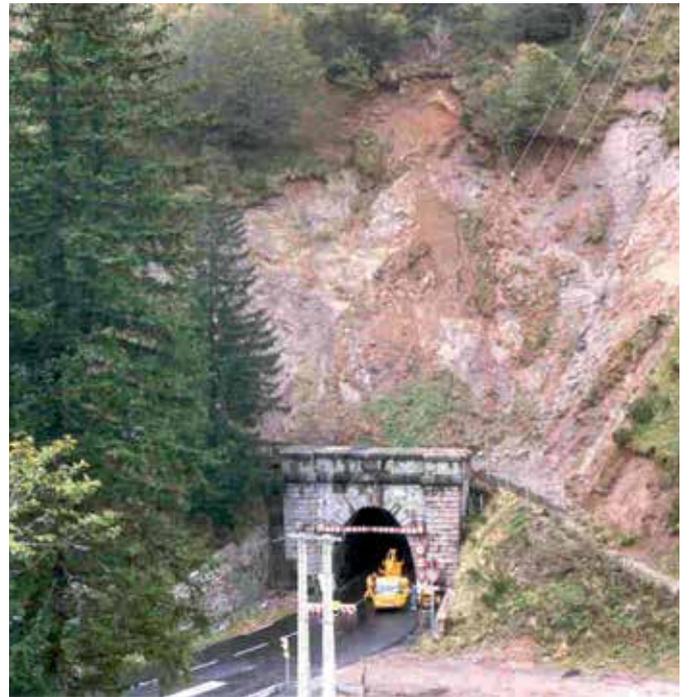


Figure 3 : fausse tête

Ouvrage de tête

Il s'agit d'un véritable prolongement du tunnel, réalisé à l'air libre, sur plusieurs mètres. La structure peut être différente de celle du tunnel. L'ouvrage de tête répond à des contraintes de sécurité, mais aussi aérauliques, esthétiques ou d'aménagement de surface en milieu urbain. Lorsque l'ouvrage est remblayé, on parle de tranchée couverte.

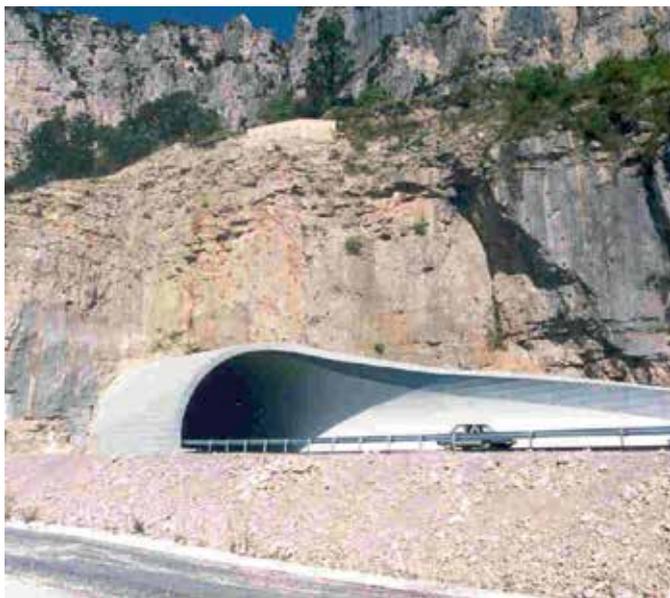


Figure 4 : ouvrage de tête architectural

3.3.2 Ouvrages connexes

On désigne par ouvrages connexes les stations de ventilation, les passages supérieurs ou autres types d'ouvrages qui prolongent souvent les tunnels de grande longueur et font office de «tête». Il peut aussi s'agir de puits de ventilation, de galeries parallèles (techniques, d'évacuation, ...), de certaines stations de ventilation intermédiaires construites à partir de la surface jusqu'au niveau du tunnel.

Ces structures, très diverses, entrent dans le champs des inspections détaillées mais doivent être inspectées par des prestataires spécialisés (experts en bâtiments, spécialistes en travaux acrobatiques), différents des organismes ou bureaux d'études compétents en inspections de tunnels.



Figure 5 : usine de ventilation en tête de tunnel

3.3.3 La section courante

Par opposition à la «tête», il s'agit de l'intérieur du tunnel au sens strict. Le terme fait référence au profil en travers prépondérant dans l'ouvrage.

Des sections «non courantes» existent au droit d'aménagements particuliers, comme les *galeries de retournement*, les *garages*, les *niches*, les *abris*, ...

Limites de la section courante

Pour les tubes creusés, si les positions des fronts d'attaque de l'excavation sont précisément notées dans les documents relatifs au creusement, elles font référence à des points métriques (PM) de chantier dont la matérialisation a souvent disparu une fois l'ouvrage fini.

Cette perte d'information peut poser problème quand il s'agit de recalculer précisément la coupe géologique de l'excavation (ou les limites d'un soutènement, ...) sur le relevé d'intrados dans le but de chercher des corrélations avec des désordres constatés.

En l'absence de données plus précises, on considère que les extrémités des derniers anneaux entièrement coulés en souterrain constituent les limites de la section courante du tube.

Les limites entre la section courante et les diverses structures qui peuvent la prolonger (casquettes, fausses têtes, murs anti-recyclage des fumées, locaux techniques, ...) sont toujours marquées par des joints souvent identifiables.

Pente ou rampe

Ces termes désignent l'inclinaison en pourcentage du profil en long du tube. La pente est employée pour désigner un profil descendant, la rampe pour un profil ascendant, dans le sens des points de repères (PR) ou des points métriques (PM) croissants.

Dévers

Le dévers désigne l'inclinaison de la chaussée suivant le profil en travers du tube. Il s'exprime en pourcentage.

Dans les tunnels, qu'ils soient unidirectionnels ou bidirectionnels et si les caractéristiques géométriques le permettent, le profil en travers présente un dévers unique qui permet d'implanter le dispositif de collecte des eaux de ruissellement d'un seul côté. On évite ainsi tout changement de côté qui serait trop contraignant pour le passage sous chaussée des réseaux.

Hors profil / en profil (ou sous profil)

Lors des travaux d'excavation, le hors profil est un volume du terrain encaissant excavé à l'extérieur du contour (ou profil théorique) prévu. Cette sur-excavation peut être due à un tir d'explosif mal maîtrisé ou à une résistance moindre du terrain.

Par opposition, le en-profil est un volume de terrain situé, après excavation, à l'intérieur du contour prévu. Le terme peut s'appliquer également à un volume de revêtement qui serait à l'intérieur du profil de l'intrados.

Section non revêtue

Il s'agit d'une section creusée et laissée à l'air libre. Ce peut être la totalité du tunnel ou seulement un ou plusieurs tronçons. Certains tronçons ont pu faire l'objet de renforcements localisés (boulonnage).

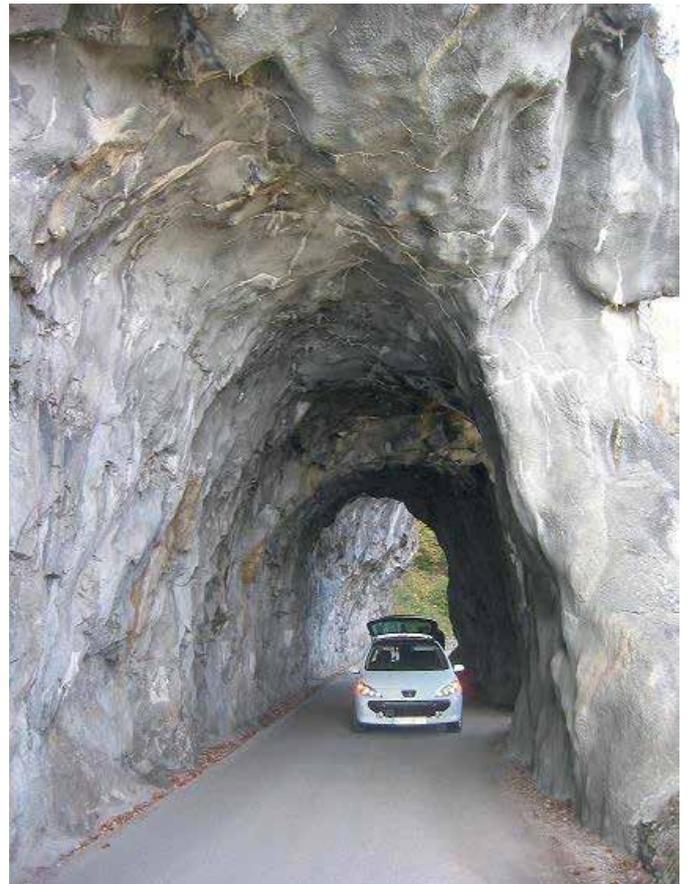


Figure 7 : tunnel non revêtu

Section revêtue

Un revêtement, partiel ou total, a été mis en place au contact du terrain ou devant celui-ci (il peut alors exister un espace annulaire, parfois visitable). L'annexe 4 présente quelques illustrations de profils en travers caractéristiques de sections revêtues de tunnels.



Figure 8 : revêtement en béton non armé

Gabarit

Le gabarit caractérise la hauteur statique maximale d'un véhicule, chargement compris, dont le passage peut être accepté, dans des conditions normales de circulation, sous l'ouvrage. Cette grandeur est associée au véhicule.

Le gabarit autorisé (G) (ou gabarit admissible) correspond au gabarit maximum admis sous l'ouvrage. Il correspond à la hauteur mentionnée sur le panneau B12, ainsi que dans le règlement de circulation. Le gabarit autorisé doit être inférieur ou égal à la hauteur libre minimale de l'ouvrage (H), diminuée des revanches dynamiques (Rd) et de protection (Rp), arrondi au multiple de 10 cm inférieur.

La hauteur libre minimale (H) (ou tirant d'air) se définit comme la distance minimale entre tout point de la chaussée et tout point de la sous-face de l'ouvrage ou des équipements qu'elle supporte. Pour mesurer cette hauteur libre, il n'est pas tenu compte des équipements liés au respect de la limitation de hauteur (barre de protection des équipements, par exemple).

La revanche de protection (Rp) permet d'assurer la protection des équipements. Il est recommandé par le CETU que cette revanche de protection ait une valeur de 10 cm.

La revanche dynamique (Rd) (ou revanche de signalisation) permet de tenir compte des mouvements dynamiques des véhicules en circulation. Cette revanche, qui constitue une contrainte réglementaire, doit être au moins égale à 20 ou 30 cm.

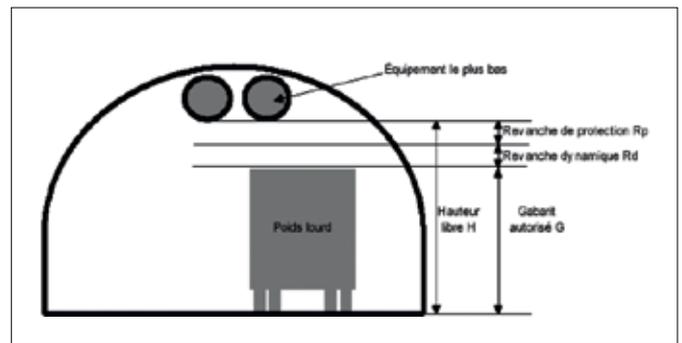


Figure 9 : illustration des différentes hauteurs à prendre en compte dans la détermination du gabarit d'un tunnel

Type de route	Gabarit autorisé (G)	Hauteur libre minimale (H) sans équipement	Hauteur libre minimale (H) avec équipement
Cas général	4,10 m	4,30 m	4,40 m
Route internationale	4,30 m	4,50 m	4,60 m
Autoroute	4,50 m	4,75 m	4,85 m

Figure 10 : hauteur des ouvrages routiers



Figure 11 : panneau B12 indiquant le gabarit autorisé

Intrados

Ce terme désigne la surface composée de la face inférieure d'une voûte, d'une dalle ou d'une traverse, et de la face interne des piédroits. C'est donc la face intérieure et visible du tube.

Pour les tunnels non revêtus, l'intrados correspond à la « surface d'excavation ».

Extrados

L'extrados se définit comme la surface convexe extérieure du revêtement du tunnel, au contact avec le terrain encaissant.

Pour un revêtement classique de voûte de tunnel, il est invisible.

Il est parfois accessible pour des structures autostables (coques, doubles voûtes).

Voûte

La voûte est la partie visible du revêtement située au-dessus de la chaussée. Elle se compose des piédroits, des reins (ou naissances) et de la calotte. La clé est le point le plus haut de la voûte.

Calotte

La calotte ou toit est la partie supérieure et centrale de la voûte. Elle peut avoir diverses formes : plein cintre (ronde), ogivale ou plate. La partie de la voûte comprise entre la calotte et la partie supérieure des piédroits s'appelle la naissance (ou rein). Elle se situe entre l'amorce du rayon de la calotte et le sommet des piédroits.

Piédroit

Les piédroits sont les parties latérales de la section du tube, comprises entre les reins et la chaussée (ou les trottoirs) de l'ouvrage. Les piédroits peuvent être droits et verticaux, ou légèrement concaves.

Radier

Le radier est la partie inférieure d'un tunnel parfois construite entre les deux piédroits pour répondre à une exigence de rigidité du revêtement au passage de terrains de mauvaise qualité ou à une exigence d'étanchéité. Il n'est plus visible après la mise en place de la chaussée.

Le radier, quand il existe, peut être constitué par une dalle (radier plan) ou un arc en béton (radier contre-voûté). Ses désordres éventuels ne peuvent plus être observés directement, mais seulement soupçonnés par ceux qu'ils vont induire sur les structures proches ou dans la chaussée.

Dans les documents relatifs à la construction de l'ouvrage, il peut être mentionné la réalisation d'un radier provisoire.

Il s'agit d'une plate-forme, le plus souvent en béton, nécessaire à la circulation des engins pendant le chantier. Ce radier n'a aucun rôle structurel et peut être démolé avant la réalisation des chaussées définitives.

Contre-voûte

Voir radier

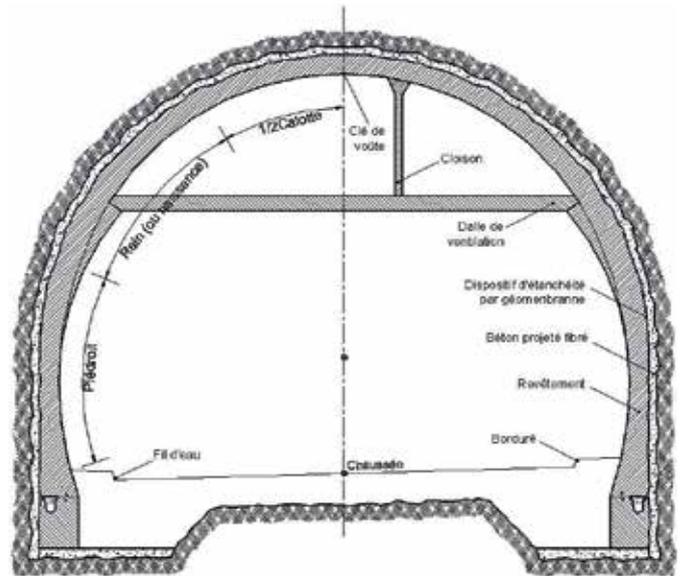


Figure 12 : découpage d'un profil en travers de tunnel

Revêtement

Il peut être constitué de maçonnerie de briques ou de moellons de pierre, de béton projeté, de béton coffré en place ou préfabriqué.

Dans le cas de tunnels anciens « parés en pierres assises » (pierres de tailles assises dans du mortier), le revêtement peut être aussi appelé parement.

Les voussoirs sont des éléments préfabriqués de forme galbée, dont l'assemblage constitue le revêtement d'un tunnel généralement creusé au moyen d'un tunnelier. Ils peuvent être en béton armé, en acier, en fonte ou en fonte ductile. Les voussoirs de clé permettent la fermeture (le clavage) de l'anneau de revêtement et le blocage par compression des autres voussoirs contre le terrain. Malgré leur nom, ils ne sont pas obligatoirement situés au point le plus haut de la voûte.

Parements rapportés ou habillages

Les tôles parapluie, les bardages et autres parements (en tôles métalliques, en matériaux composites ou préfabriqués en béton) ne sont pas des revêtements au sens strict du terme car ils ne font pas partie intégrante de la structure du tunnel.

Il en est de même des éléments de protection passive contre les incendies mis en place sur les voûtes et les dalles de ventilation.

On distingue les parements adhérents, plaqués ou décalés par leur mode de fixation à la structure de l'ouvrage.

Étanchéité du revêtement

Il s'agit des dispositifs mis en place pour empêcher les eaux naturelles d'entrer en contact avec le revêtement (dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) dans les tunnels neufs), d'y créer des désordres ou de parvenir en partie circulée. Ils sont toujours associés à un dispositif de drainage spécifique (drains ou caniveaux extradados), définitivement masqué par le revêtement.

Drainage du revêtement

C'est l'ensemble des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux naturelles collectées à la base de l'étanchéité (cas des DEG) ou traversant le revêtement (cas des tunnels sans étanchement en extradados) et susceptibles d'altérer la structure ou d'en pénaliser l'exploitation. Dans les cas de drainage des eaux traversantes, les dispositifs sont, le plus souvent, mis en place à titre curatif depuis l'intrados des tunnels déjà en exploitation. Les désordres qui les affectent sont alors clairement visibles.

A l'inverse, lorsqu'il y a un étanchement en extradados, ces dispositifs sont complétés par des regards de visite, souvent situés dans des niches.

Chaussée

C'est l'ensemble des couches de matériaux mis en place sur le radier (naturel ou construit). La chaussée peut se réduire à une seule couche de roulement sur une dalle en béton dans le cas de gaines de ventilation basses ou de chaussées superposées. Les appuis de ces dalles peuvent être le siège de désordres particuliers.

Drainage du corps de chaussée

Ce sont les dispositifs drainants mis en place dans le corps de chaussée ou intégrés aux radiers dont le rôle est de collecter et d'évacuer les eaux naturelles circulant dans le corps de chaussée.

Leur dysfonctionnement peut induire des désordres en chaussée. Leur inspection ne peut se faire que par caméra endoscopique ou ponctuellement au droit d'un regard de visite.

Assainissement de la chaussée

Ce sont les dispositifs mis en place sur les accotements ou dans le corps des trottoirs pour collecter et évacuer les eaux de ruissellement de la chaussée. Il s'agit soit de caniveaux à fente, soit de trottoirs-caniveaux qui amènent les eaux vers des regards avaloirs.

Dans les tunnels de plus de 300 m de long, les caniveaux à fente sont connectés à des regards siphoniques qui intègrent un système « coupe-feu ».

Le dysfonctionnement de l'assainissement peut induire des désordres en chaussée et altérer le fonctionnement « coupe-feu » des regards siphoniques. L'inspection des canalisations ne peut se faire que par caméra endoscopique ou ponctuellement au droit d'un regard de visite.

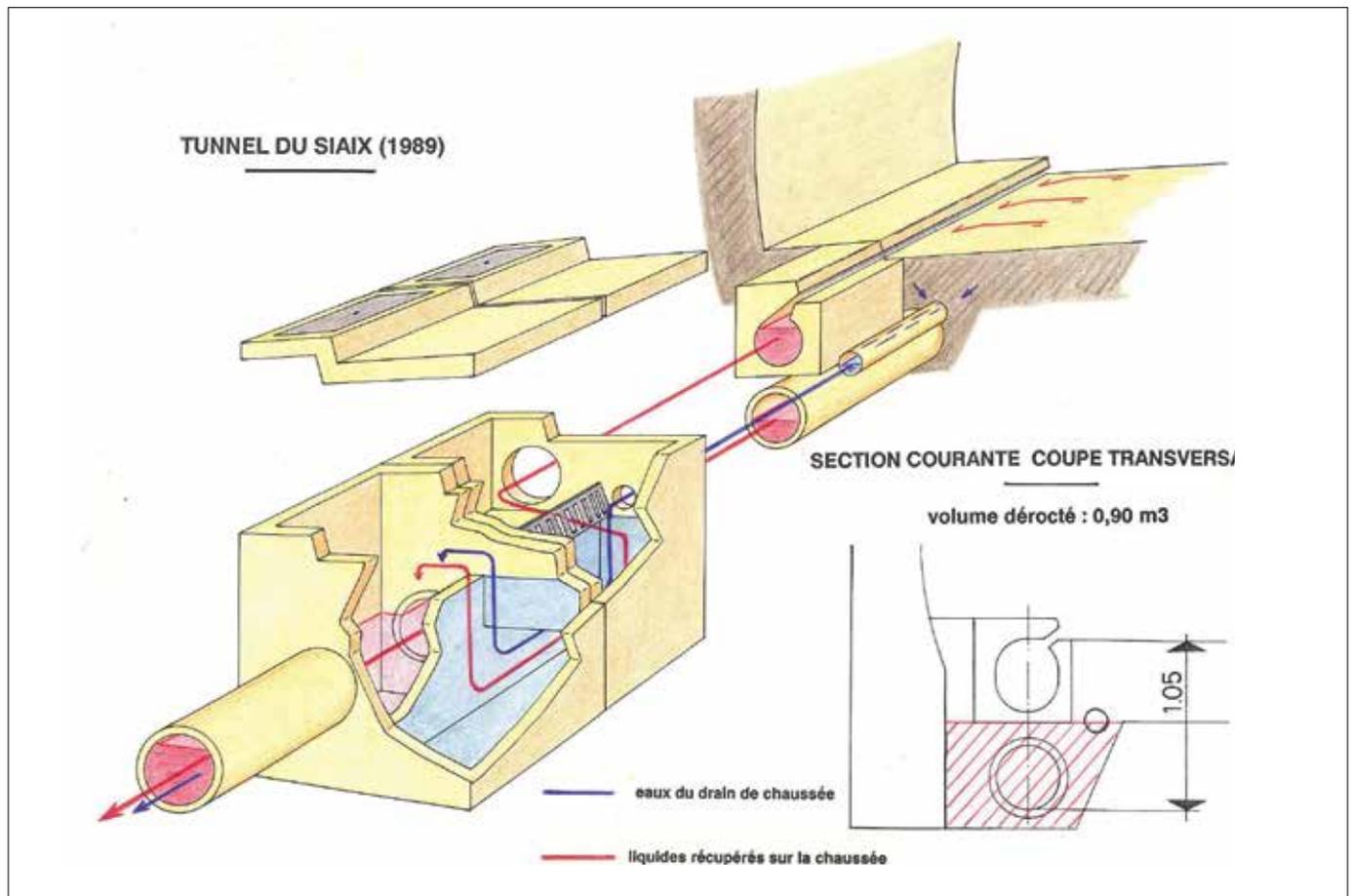


Figure 13 : regard de renvoi siphonique

Équipements de génie civil (second œuvre)

Ces éléments, mis en place à l'intérieur du profil en travers du tunnel, n'ont aucun rôle structurel. Ils sont constitués par :

- les dalles (ou plafond) et leurs appuis,
- les cloisons entre gaines,
- les suspentes de dalles,
- les joints de chaussée (dalle supportant une chaussée),
- les appareils d'appuis (dalle supportant une chaussée ou dalle de ventilation).

Ces parties d'ouvrages sont généralement accessibles et matérialisent souvent des espaces dédiés à la ventilation, à l'exploitation ou à la sécurité.

LES DÉSORDRES

Les désordres ou défauts les plus souvent constatés en inspection de tunnel ont été regroupés et classés par thème sous forme d'un catalogue séparé qui constitue le livre 2 du présent guide. Les inspecteurs disposent ainsi de fiches détaillées pratiques à utiliser. C'est aussi un outil d'information des gestionnaires sur les risques spécifiques au génie civil et à la présence d'eau dans les tunnels.

Le présent chapitre introduit ce catalogue des désordres et définit bon nombre d'éléments de terminologie que l'on retrouve dans les fiches.

4.1 INTRODUCTION

Nouveaux tunnels, nouveaux désordres

Le génie civil des tunnels tend à devenir de plus en plus complexe. Les techniques actuelles permettent de réaliser des ouvrages répondant aux exigences accrues imposées pour l'exploitation et la sécurité.

Les équipements de génie civil (second œuvre) comme les plafonds et les cloisons de gaines de ventilation peuvent présenter des désordres ou des défauts inhérents à la conception, la réalisation et au mode de fonctionnement.

Dans les tunnels récents (depuis 1980 environ), le revêtement en béton coffré et la mise en place systématique d'une étanchéité ont fortement réduit les problèmes de venues d'eau, mais d'autres désordres sont apparus, concernant en particulier les dispositifs d'étanchéité, de drainage ou d'assainissement.

L'héritage du passé, toujours présent

Parallèlement, si la rénovation des tunnels anciens les plus dégradés tend à faire disparaître progressivement certains désordres ou défauts autrefois courants, ceux-ci perdurent cependant sur d'autres tunnels. Il est donc important de ne pas en perdre la connaissance.

Le catalogue 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 CETU en 2004.

Savoir voir et savoir quoi voir

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 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». Aussi, il est parfois difficile d'établir une hiérarchie, qui constitue le premier pas vers un diagnostic puis la recherche d'un traitement.

Comprendre

Il est nécessaire de rechercher l'origine de ces désordres ou défauts, si possible pendant l'inspection. Leur gravité et leur évolution dépendent d'une combinaison variable entre les deux types de causes suivantes :

- les causes dites « internes », liées aux caractéristiques intrinsèques des matériaux de revêtement (composition, porosité, texture, micro-fissuration, ...), que l'on pourrait assimiler à des « faiblesses » ;
- les causes dites « externes », liées au milieu ambiant, au comportement du massif encaissant, aux fonctions de l'ouvrage, que l'on pourrait qualifier d'« agressions » et qui peuvent être d'ordre physique, chimique, fonctionnel, non exclusives les unes des autres. L'influence de l'eau est présente dans bon nombre de ces « agressions ».

Contrairement aux défauts, l'apparition tardive de désordres impose toujours de revenir à la conception et aux conditions de réalisation de l'ouvrage. Il est donc primordial de consulter l'intégralité du dossier d'ouvrage établi par le maître d'ouvrage constructeur et complété au cours de sa vie par le service gestionnaire.

4.2 TERMINOLOGIE

De nombreux termes sont employés dans la littérature technique pour évoquer les « anomalies » (au sens large) affectant les ouvrages. Tous ne sont pas normalisés et certains sont synonymes. Ils reflètent le plus souvent la culture de chaque corps de métier.

Quelques définitions simples, applicables dans le cadre des inspections de tunnels, sont proposées ci-après.

4.2.1 Définitions proposées dans le cadre des inspections

Défaut ou malfaçon

Un défaut (ou une malfaçon) résulte d'une tâche manifestement mal exécutée ou de spécifications non respectées. C'est une imperfection, visible ou invisible, ponctuelle ou systématique, affectant une partie d'ouvrage. Il est généralement sans conséquence mais peut aussi participer à un désordre, le provoquer ou l'aggraver.

La plupart des défauts rencontrés en tunnel n'ont aucune incidence sur la sécurité ou la pérennité des structures.

Exemples :

- défauts d'aspect des parements,
- défaut d'alignement d'une maçonnerie ou d'anneaux de béton, lors de la construction,
- déformation ponctuelle d'un coffrage, éventuellement reproduite dans chaque anneau coulé,
- en tunnels anciens non revêtus, hors profils importants mal maîtrisés au creusement,
- ségrégations ou reprises de bétonnage trop fréquentes en béton coffré.

Désordre

On appelle désordre tout problème affectant un élément ou une partie d'ouvrage, se manifestant progressivement ou brutalement et qui dénote une évolution ; c'est un symptôme. Il se distingue du défaut, qui est une imperfection ponctuelle ou systématique, le plus souvent acquise lors de la construction. Un synonyme est le terme d'avarie, employé plus particulièrement par la SNCF.

Les causes des désordres sont multiples. Outre l'évolution défavorable de défauts ou malfaçons, les principaux pourvoyeurs de désordres sont l'altération des matériaux et des structures, le comportement du terrain encaissant et l'action de l'eau.

Il est important de rechercher assez tôt, pendant l'inspection de l'ouvrage, les causes probables des désordres constatés.

Exemples :

- apparition de fissures, de déformations,
- altération de mortiers, de moellons, écaillage, ruptures,
- apparition ou déplacement de venues d'eau.

Les désordres évoluent de façons différentes et les termes ci-après l'illustrent :

- désordre « éteint » : des réparations ont supprimé la cause du désordre bien que ses traces soient encore visibles (par exemple, maçonnerie régénérée mais déformation toujours apparente) ;
- désordre « dormant » : le désordre existe et est susceptible d'être réactivé par une modification des conditions locales (par exemple, reprise d'un glissement à une tête, gonflements liés à une hydratation des argiles, ...) ;
- désordre « actif » : le désordre existe et les conditions courantes l'entretiennent. Cette activité peut se manifester :
 - de façon continue (par exemple, altération chimique),
 - par à-coup (par exemple, déformation, fissure, écaillage),
 - par cycles (par exemple, désordres liés aux variations thermiques saisonnières du revêtement), avec ou sans dérive dans le temps.

Pathologie

On peut définir la pathologie comme étant la synthèse de tous les désordres reconnus, des facteurs qui les déclenchent ou les entretiennent et de l'évolution probable de la situation.

Une bonne connaissance de la pathologie permet d'orienter efficacement le choix des réparations.

4.2.2 Termes liés aux manifestations de l'eau

L'eau et les matériaux qu'elle entraîne, qui apparaissent à l'intérieur de l'ouvrage, peuvent être décrits à l'aide des termes suivants.

Humidité

Aucun écoulement n'est visible. Les zones humides plus ou moins étendues s'initient à partir d'une fissure, d'un joint, ou de tout autre défaut du revêtement, y compris une perméabilité générale importante. L'humidité est liée à la saison ou aux régimes thermiques et aérauliques du tunnel.

Dans la recherche des causes, il faut être circonspect car l'humidité est parfois provoquée par un simple phénomène de condensation sur l'intrados.

Suintement

Un léger écoulement en nappe est visible, sans que l'on puisse localiser avec certitude le ou les exutoires. Ce désordre est quantifié par l'aire de son extension.

Venue d'eau

L'écoulement d'eau est visible à partir d'un exutoire repéré. Il devient possible d'estimer, voire de jauger un débit. On distingue les venues d'eau discontinues (goutte-à-goutte) et les venues d'eau continues (débit plus important).

Remontée d'eau

Une remontée d'eau au travers du corps de chaussée peut être qualifiée de résurgence, ce qui la différencie d'une humidité provenant de la voûte, des piédroits ou des véhicules.

Exsudats

La présence d'eau provoque le dépôt de produits de différentes natures (sur l'intrados ou sur une surface libre) qualifiés aussi d'exsudats. Ceux-ci étant des témoins de l'activité chimique interne, il est nécessaire de bien les définir.

Le terme « concrétion » est réservé à tous les dépôts solides et adhérents : carbonate de calcium (ou calcite), sulfate de calcium (ou gypse), hydroxyde de fer (ou goethite). Une « stalactite » est une concrétion qui se forme autour d'un exutoire ponctuel généralement situé en calotte ou en rein.

Le terme « efflorescence » est une appellation spécifique qui s'applique à des exsudats fragiles et temporaires qui apparaissent dans certaines conditions d'humidité du support ou de l'air, tout particulièrement sur les mortiers. Directement liés à la présence de sulfates à la surface ou au sein du support, ils peuvent prendre la forme d'un chevelu ou d'une poudre blanche (sulfate de sodium).

Le terme « dépôt », par opposition aux précédents, s'applique à tous les dépôts non solides ou faiblement adhérents, liés à une circulation d'eau, et qui peuvent apparaître et s'accumuler sur une surface libre. Ils peuvent prendre la consistance d'une boue, d'un gel (produits ferriques) ou provenir, dans de rares cas, d'actions bactériennes.

Dans le cas de drains ou collecteurs, examinés à leur débouché ou par vidéo-endoscopie, on s'attache à différencier les concrétions (produits solides) des accumulations diverses (fines, sables, boues...) ou des colmatages résultant des travaux mal exécutés (pertes de coulis, d'enrobés, de béton...). On parle alors de drain « concrétionné » par de la calcite ou de collecteur « colmaté » ou « engorgé », les deux désordres pouvant se cumuler dans un même espace.

4.3 CATALOGUE DES DÉSORDRES

4.3.1 Liste des désordres

Le catalogue des désordres est composé de 47 fiches décrivant les principaux désordres et défauts constatés dans les tunnels routiers et la manière de les détecter, les identifier et les évaluer. Les fiches sont regroupées et identifiées par famille.

Désordres liés à l'eau	
Venues d'eau	HY-1
Concrétions	HY-2
Effets du gel	HY-3
Efflorescences sur mortiers et bétons	HY-4
Désordres de la zone d'influence	
Karsts et cavités	ZI-1
Désordres aux têtes	ZI-2
Instabilités de pentes	ZI-3
Désordres des tronçons non revêtus	
Blocs ou masses lâchés	NR-1
Plaques ou bancs fléchis	NR-2
Altérations des matériaux constitutifs des revêtements	
Revêtements de maçonnerie de moellons ou de briques	
Alvéolisation	RM-1
Desquamation	RM-2
Exfoliation	RM-3
Écaillage mécanique	RM-4
Altérations des mortiers – Déjointoiement	RM-5
Altérations des matériaux constitutifs des revêtements	
Revêtements de béton (coulé en place ou préfabriqué)	
Épaufrures	RB-1
Altérations des bétons – Gonflements	RB-2
Écaillage mécanique	RB-3
Éclatements sur armatures	RB-4
Désordres des bétons projetés	RB-5
Désordres des dispositifs d'étanchéité, de drainage et d'assainissement	
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 cuvelage d'étanchéité	ED-6
Désordres des enduits minces	ED-7
Désordres des complexes isolants étanches	ED-8
Désordres dus aux joints hydro-gonflants	ED-9

Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage	
Fissures	
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
Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage	
Déformations	
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
Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage	
Désordres liés à la mise en œuvre	
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
Désordres des équipements de génie civil	
Désordres sur les chaussées	EQ-1
Désordres des dalles et des cloisons	EQ-2
Désordres liés aux incendies	
Désordres dus aux incendies	IN-1
Désordres liés à des défauts d'entretien	
Défauts d'entretien	EN-1

Seuls les désordres ou les défauts les plus fréquemment rencontrés dans les tunnels routiers font l'objet d'une fiche. Pour les descriptions de désordres plus rares ou affectant les ouvrages ferroviaires ou hydrauliques, l'inspecteur 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.

4.3.2 Fiche-type de désordre

Les fiches, regroupées par famille, ont toutes le même type de mise en forme présenté ci-dessous.

APPELLATION DU DÉSORDRE (NOM USUEL)	TYPE – N°
	Description (aspect visuel du désordre)
<i>Façon dont il se manifeste à l'œil de l'observateur.</i>	
	Méthodes d'examen
<i>Manière de l'appréhender voire de le découvrir s'il n'est pas visible.</i>	
	Paramètres à relever
<i>Éléments matériels ou mesurables qui lui sont liés.</i>	
	Désordres ou défauts associés à rechercher
<i>Éléments utiles au diagnostic.</i>	
	Origines et causes possibles
<i>Interprétations faites en fonction de la connaissance de l'ouvrage.</i>	
	Facteurs aggravants
<i>Éléments susceptibles d'aggraver ou d'accélérer l'évolution du désordre.</i>	
	Conséquences, évolutions possibles
<i>Description de l'évolution du désordre en l'absence de travaux d'entretien ou de réparation.</i>	
	Dangers pour les usagers
<i>Approche immédiate des incidents ou accidents que peuvent subir les usagers (le cas échéant, la couleur rouge du bandeau signale l'existence possible d'un danger lié à la présence du désordre).</i>	
	Risques pour les structures
<i>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).</i>	
	Surveillance
<i>Mesures à prendre et observations à faire à court et moyen terme.</i>	
	Remèdes
<i>Base de réflexion sur les traitements qui peuvent s'appliquer pour supprimer le désordre ou en ralentir l'évolution.</i>	
	Observations
<i>Éléments faisant le lien avec d'autres désordres ou précisant certains des points précédents.</i>	
	Informations complémentaires
<i>Descriptions, photographies et schémas expliquant et illustrant le désordre.</i>	

FACTEURS DE DÉSORDRES

L'inspection d'un tunnel a pour but de mettre en évidence les désordres que subit un tunnel dans le temps afin d'établir un diagnostic de l'état de l'ouvrage. Les désordres constatés sont ainsi les conséquences d'un problème qui peut avoir des origines diverses :

- les conditions géologiques, géotechniques et hydro-géologiques du massif qui entourent la section du tunnel peuvent agir sur celui-ci, soit en extrados si un revêtement existe soit directement en paroi ;
- la construction lorsque des défauts de conception, de réalisation ou encore de nature des matériaux constituant le tunnel sont avérés ;
- le vieillissement des matériaux induit par les différentes agressions chimiques auxquelles est soumis l'ouvrage.

Le diagnostic a ainsi pour but d'identifier la part relative de chacun de ces facteurs. Lorsqu'un revêtement existe, seul son intrados sera révélateur de désordres. Une bonne connaissance de la constitution d'une section revêtue de tunnel ainsi que la compréhension de son fonctionnement sont alors indispensables : les annexes 4 et 5 pourront être utilement consultées à ce propos.

5.1

FACTEURS LIÉS AUX CONDITIONS GÉOLOGIQUES, GÉOTECHNIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

La vie d'un tunnel comporte deux étapes : une étape de construction et une étape d'exploitation. L'inspecteur intervient le plus souvent lors de la seconde phase d'exploitation afin de caractériser l'évolution dans le temps de l'ouvrage. Pour autant, les informations collectées lors de la phase de creusement sont essentielles puisqu'elles traduisent exactement les conditions du terrain dans lequel le tunnel est creusé. Dans le cas d'un tunnel revêtu, c'est uniquement au moment du creusement que les informations d'ordre géologique, géotechnique et hydrogéologique sont disponibles.

Considérant la zone d'influence géotechnique, les désordres peuvent être de trois natures différentes ou combinées :

- géologiques et géotechniques : la nature et les caractéristiques des terrains traversés sont des données primordiales qui influent en premier lieu sur le comportement de l'ouvrage. Par exemple, une zone singulière rencontrée lors du creusement est susceptible d'avoir des répercussions ultérieures sur la stabilité des structures mises en place selon les traitements mis en oeuvre en phase chantier ;
- hydrogéologiques : les caractéristiques hydrogéologiques du massif jouent un rôle prépondérant dans l'initiation ou l'accélération du vieillissement des structures ;
- environnementales : les actions anthropiques aux abords d'un tunnel peuvent avoir des répercussions sur la section courante de l'ouvrage ou à ses extrémités. Par ailleurs, les actions biologiques, climatiques et sismiques sont des catalyseurs de désordres.

Le chapitre suivant s'attache à faire le lien entre les désordres constatés en tunnel et leurs origines décelables au moment du creusement.

On distingue trois cas de figure :

- *les tunnels (ou tronçons) non revêtus* : les désordres d'origines géotechniques seront des chutes de blocs par diminution des caractéristiques mécaniques des joints ou de la matrice par altération ;
- *les tunnels revêtus anciens* : de nombreuses reconnaissances au travers des maçonneries ont montré l'existence de vides plus ou moins importants. Ces vides sont soit originels, soit créés par transport des matériaux. Le fonctionnement du revêtement étant optimal lorsqu'il est au contact du terrain, sa déconnexion l'affaiblit ponctuellement, ce qui peut provoquer sa ruine. Notons qu'un gonflement des terrains produit les mêmes effets dans la mesure où la contrainte exercée n'est pas prise en compte dans le dimensionnement du revêtement ;
- *les tunnels revêtus modernes* : les techniques de construction actuelles visent à confiner rapidement le terrain excavé par le soutènement. Pour autant, les revêtements sont dimensionnés pour reprendre l'ensemble des contraintes sans prise en compte du soutènement.

5.1.1 Caractéristiques géologiques et géotechniques du massif encaissant

Les caractéristiques du massif rocheux

Les caractéristiques d'un massif rocheux peuvent être succinctement décrites par sa lithologie, son état de fracturation et la présence de zones singulières. Dans le cas d'un tunnel non revêtu, ces données sont directement observables. Dans le cas d'un tunnel revêtu, les documents géologiques relatifs à son étude et à sa construction constituent les seules données disponibles en dehors d'investigations complémentaires. La réalisation de telles investigations est rare.

• La lithologie

De manière assez schématique, on distingue les terrains sédimentaires des terrains magmatiques ou métamorphiques :

- les terrains sédimentaires peuvent être constitués d'une alternance de bancs durs (calcaire) et de bancs (ou d'interlits) plus tendres (marnes). En massif calcaire, la forme des anciennes excavations non revêtues est souvent liée à la disposition de bancs les plus compacts utilisés en « toit » afin de garantir la stabilité du tunnel. La section finale du tunnel peut conserver cette structure avec des formes irrégulières ;
- les terrains métamorphisés présentent une fracturation souvent importante en tout premier lieu créée par leur foliation. Cette foliation forme un feuilletage plus ou moins prononcé pouvant générer des instabilités de plaques ;
- les terrains détritiques et volcaniques sont par exemple les anciennes accumulations détritiques (molasses, conglomérats) ou volcano-détritiques (brèches pyroclastiques) qui se comportent comme un milieu continu. Elles ne sont ni stratifiées ni structurées de manière marquée et peuvent être sensibles à l'altération.

• La fracturation

Qu'elles soient d'origine stratigraphique ou tectonique, les discontinuités présentes dans le massif rocheux constituent des plans de faiblesse qui diminuent ses caractéristiques mécaniques. Notons qu'une fracturation supplémentaire a pu être induite par les méthodes de creusement appliquées. L'orientation, l'espacement, l'extension, la rugosité, l'altération des épontes, l'ouverture, le remplissage et la présence d'eau sont les huit paramètres qui caractérisent les discontinuités. Ces caractéristiques jouent un grand rôle dans l'apparition et l'évolution des instabilités. Les instabilités prennent la forme de dièdres ou de plaques délimités par les discontinuités présentes dans le massif.

• Les zones singulières

Le tunnel peut avoir croisé des zones de failles. Ce sont des zones singulières caractérisées par une fracturation plus intense. Le stade ultime de cette fracturation est un broyage complet (mylonite) ou localisé (brèche de faille) de la roche qui, au fil du temps, a pu être recimentée de manière plus ou moins complète. Suivant sa direction par rapport au tunnel, une faille peut générer des instabilités sur une longueur importante.

Les évolutions du massif rocheux comme sources de désordres

• Durant le creusement : la décompression

Soumis au poids des terrains et d'éventuelles compressions tectoniques, le massif rocheux est comprimé. Le creusement occasionne une décompression des terrains autour du tunnel. Suivant les cas, soit on laisse cette décompression se réaliser, soit elle est stoppée pour éviter d'éventuels tassements de surface.

Sauf exceptions, dans le cas d'un tunnel en exploitation, on peut considérer que le massif a retrouvé un nouvel équilibre et que la décompression n'est pas un facteur de désordre, à contrario de l'altération.

• Pendant l'exploitation : l'altération

L'altération est presque essentiellement liée à l'action de l'eau (eau du terrain, humidité de l'air). Elle tend à affaiblir les caractéristiques mécaniques du massif en changeant les caractéristiques minéralogiques des roches, des joints et de leur remplissage. C'est donc un comportement à moyen et long terme.

La sensibilité à l'altération dépend de la nature des minéraux, de leur texture et de la porosité. On peut citer quelques exemples typiques :

- les évaporites (gypses) sensibles à la dissolution qui conduisent à la formation de cavités ;
- l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre) possédant un fort potentiel de gonflement ;
- les minéraux argileux (smectites par exemple) possédant un fort potentiel de gonflement ;
- l'altération de la matrice de certains conglomérats dans des zones de moindre cohésion avec pour conséquence la chute d'éléments avec parfois de grands hors profils ;
- l'altération des roches sédimentaires avec dissolution de la part calcaire (molasses à ciment calcaire devenant sableuses et friables par exemple) avec pour conséquence la chute d'éléments ;
- l'altération profonde des matrices des roches magmatiques et métamorphiques avec formation de minéraux philliteux (s'apparentant à des argiles) sensibles à l'eau (gonflement).

5.1.2 Caractéristiques hydrogéologiques

La présence d'eau dans un massif

L'eau est potentiellement présente dans tous les massifs dans la mesure où une part des précipitations s'infiltré dans le sol. Le niveau d'eau dans le massif détermine la charge hydraulique et la facilité qu'a l'eau de se déplacer dans le massif est représentée par sa perméabilité. La typologie de la perméabilité dépend des terrains rencontrés :

- terrains granulaires (types sables et graviers) où l'eau circule dans les pores, ou vides entre les grains ;
- roches fracturées (granite, gneiss, basalte, etc.) où l'eau ne circule que dans les fractures ;
- terrains à double porosité, où l'eau circule à la fois dans les fractures et dans la matrice poreuse (craie, grès) ou altérée (granite arénisé) ;
- roches karstifiées (calcaire, gypse) où l'eau circule surtout dans des conduits aux dimensions et répartitions aléatoires ;
- zones faillées (les zones singulières), remplies de matériaux broyés qui jouent souvent le rôle de drains au sein de massifs fracturés.

Les effets dommageables de l'eau pour le tunnel

• Altération

L'augmentation de la teneur en eau de certains matériaux sensibles les altère et les ameublissent, rendant possible leur érosion.

• Érosion, transport et dépôt

L'action mécanique d'un ruissellement entraîne les particules libérées (cas des mortiers de blocage qui disparaissent) et les dépose (amas de granulats sous des poches de béton altéré ou de sable au pied des maçonneries). Des vides se créent lentement au sein des structures. Pour autant que les espaces libres le permettent, les eaux de ruissellement entraînent les fines, qui viennent colmater les drains et les collecteurs.

• Gel

En région froide, le gel peut avoir une influence néfaste sur les structures (accumulations de glace), mais aussi sur les constituants des matériaux poreux (moellons, mortiers, bétons). On constate que ce n'est pas l'intensité du gel qui déclenche la gélifraction mais la fréquence des alternances gel-dégel ; par contre, l'intensité et la durée du gel règlent la profondeur atteinte dans le matériau. La mise en place systématique des étanchéités d'extrados en tunnels neufs supprime une partie de ces problèmes.

• Pression hydrostatique

Les débits qui parviennent en tunnel (ou au contact de son revêtement) dépendent du type de perméabilité du massif. La plupart des tunnels routiers creusés étant situés hors nappe phréatique, les mises en pression du revêtement sont exceptionnelles, le plus souvent de faible durée, et n'affectent pas la totalité de l'ouvrage. Elles peuvent survenir au droit de zones plus perméables, de karsts ouverts ou de failles. Elles peuvent alors concentrer des débits temporairement forts au droit de structures mal drainées (tunnels anciens) ou dans des zones de défauts de feuille d'étanchéité (tunnels récents).

D'une manière générale, l'eau étant un vecteur important de désordres, il faut rechercher son origine (naturelle, fuite de réseaux), sa composition chimique et ses débits (variables).

L'annexe 6 résume les principales analyses qui peuvent être effectuées sur les eaux rencontrées en tunnel.

5.1.3 Causes environnementales

Actions chimiques et bio-chimiques

Les micro-organismes sont omniprésents dans les sols et les terrains. Certaines bactéries ont une action néfaste sur les structures :

- les bactéries sulfo-oxydantes (thiobacilles) mises en évidence dans les tunnels ferroviaires, les égouts et certains monuments : elles participent à la dégradation des carbonates, mais aussi des pyrites, pouvant ainsi générer une réaction sulfatique ;
- les bactéries nitrifiantes, produisant des acides nitreux ou nitriques et attaquant aussi les carbonates : présentes dans les croûtes ou concrétions superficielles, elles semblent avoir un rôle dans les desquamations de moellons mais aussi dans la « corrosion du béton » et l'apparition de certains dépôts gélifiés.

D'une façon générale, leur rôle semble plutôt catalyseur de réaction que déclencheur, expliquant qu'aucun désordre notable ne puisse leur être attribué jusqu'ici dans les tunnels routiers.

En milieu chimiquement agressif (milieu maritime par exemple), la corrosion des armatures peut être fortement accélérée.

Influence climatique

Les variations de température, principalement aux têtes mais aussi en section courante, introduisent des phénomènes de dilatation/contraction dans les structures, et jusqu'au niveau granulaire de certains matériaux (mortiers, moellons, bétons poreux), accélérant parfois leur altération. Notons que certains ouvrages de grande longueur s'affranchissent des variations de températures par leur couverture importante.

Les mouvements de l'air introduisent des dessiccations très rapides et, par conséquent, des transferts de vapeur d'eau et des migrations de sels au sein des matériaux.

Sismicité

La sismicité d'une région est un facteur à envisager, bien qu'aucun désordre avéré ne puisse lui être attribué jusqu'à présent dans les tunnels en France.

On considère que la structure constituée par le soutènement et le revêtement est solidaire du terrain et vibre de manière couplée avec celui-ci en cas de séisme ce qui est globalement favorable à sa stabilité. Toutefois, dans les tunnels modernes, des équipements de génie civil, suspendus ou en appui (dalles de ventilation, cloisons, chaussées superposées), pourraient mal réagir à certains mouvements d'origine sismique. Aussi, dans les tunnels anciens, des revêtements altérés ou mal couplés au terrain peuvent être plus exposés aux séismes.

5.2 FACTEURS LIÉS À LA CONSTRUCTION

Si les moyens d'étude actuels et le perfectionnement des techniques et des outils permettent de minimiser les incertitudes au niveau des projets et de la réalisation, les défauts liés à la construction restent toujours possibles.

Il est donc indispensable que les problèmes ayant nécessité des adaptations en cours de construction ne soient pas oubliés ou occultés (comme étant résolus) dans les synthèses concernant l'ouvrage.

Tous les défauts d'origine dont l'évolution est susceptible d'être défavorable à la structure doivent être identifiés et traités durant la phase travaux.

Dans les tunnels anciens, dont la mémoire vivante et parfois la totalité des archives ont disparu, les causes des désordres constatés ne peuvent être que déduites de l'observation, de la connaissance de cas similaires, voire de reconnaissances (analyses, fenêtres, carottages).

5.2.1 Conception

Si certains tunnels très anciens sont malgré leur âge en bon état, nombre d'entre eux présentent des pathologies manifestement liées à une mauvaise conception locale des structures. Il s'agit là d'un jugement a posteriori, déduit de l'observation prolongée d'un comportement anormal de l'ouvrage.

Nombre de tunnels anciens ont été construits sans reconnaissance approfondie ou avec des connaissances géotechniques limitées. La conception s'appuyait surtout sur des retours d'expériences. Les revêtements n'ont donc pas toujours été conçus pour résister à des comportements différés du terrain, alors insoupçonnés.

Les problèmes, parfois graves, survenant en cours de construction, ont été réglés « au mieux » avec les moyens disponibles. Ces adaptations prises dans l'urgence ont parfois mal résisté au temps.

- Exemple en tunnel ancien : la construction de la voûte en maçonnerie sous une cloche d'effondrement conduisait à mener de front boisages de sécurité et construction du revêtement par anneaux très courts ; l'absence de blocage complet se traduit, bien des années plus tard, par des instabilités rocheuses au sein du vide surmontant la voûte.

La mauvaise prise en compte de l'eau a parfois conduit à réaliser des ouvrages mal drainés, qui se sont rapidement détériorés localement. Plus proches de nous, les ouvrages modernes, bénéficiant de dispositifs drainants plus complexes, posent de nouveaux problèmes d'entretien, dont certains renvoient directement à leur conception.

- Exemple en tunnel récent : les drains de petit diamètre situés sous le niveau de la chaussée ne sont pas tous curables et s'engorgent rapidement de calcite, provoquant ainsi des mises en charge et des résurgences en chaussée ; la seule solution est alors de créer un nouveau drain.

Enfin, certaines économies faites à la conception se sont soldées par des difficultés au cours de l'exploitation ou des désordres dans la structure.

- Exemple en tunnel récent avec étanchéité totale : le recueil des eaux en extradors s'est souvent fait à l'aide de drains agricoles en PVC ; leur fragilité a conduit à leur écrasement local lors du coulage du béton de voûte ; cela s'est traduit rapidement par des remontées d'eau dans la chaussée et les caniveaux techniques.

5.2.2 Réalisation

L'influence de ce facteur peut s'appliquer à tous les types de tunnels et à toutes les époques.

Certains désordres, ayant nécessité des interventions lourdes dans des tunnels anciens, attestent des grandes difficultés d'exécution rencontrées par des entreprises qui n'ont pas toujours su faire face à un problème imprévu. Ces difficultés d'exécution expliquent aussi les malfaçons parfois graves ou systématiques qui ne se révèlent que bien plus tard au travers des désordres.

On a souvent pu noter des discordances entre le travail réalisé et les spécifications du marché, voire un non-respect des règles de l'art, malgré des contrôles pourtant prévus et formalisés.

Creusement

Les méthodes anciennes de déroctage ne permettaient pas de maîtriser parfaitement le profil des excavations (faible nombre de trous, foration manuelle, charges mal adaptées). Il en résultait un profil en travers parfois très éloigné du profil théorique.

Soutènements

Autrefois, le soutènement consistait simplement en une consolidation provisoire (boisages) permettant de bâtir le revêtement, parfois très longtemps après le déroctage. Il en résultait une décompression étendue des terrains autour de l'excavation, décompression qui est à l'origine de certains désordres apparus depuis.

Dans les tunnels modernes, la mise en place immédiate d'un soutènement évite la propagation d'une zone décomprimée trop importante dans le terrain autour de l'excavation en lui opposant une pression de confinement, ce qui va fortement ralentir la convergence (ou diminution de la section).

Revêtements

Par le passé, les revêtements étaient souvent destinés à contenir seulement une évolution locale du massif jugée menaçante pour la pérennité de l'ouvrage ou la sécurité des usagers. Ceci explique la présence de nombreux anneaux courts dans certains tunnels, alternant avec des zones non revêtues jugées plus stables.

Dans les cas de revêtements maçonnés, les projets prévoyaient un blocage de la voûte au terrain par une maçonnerie ordinaire (en provenance du déblai) liée au mortier, ou en pierres sèches. L'examen de nombreux extradados de voûte (par sondages, fenêtres de reconnaissance ou à l'occasion de ruines) a révélé que ces parties d'ouvrage étaient parfois négligées,

particulièrement en calotte où l'espace annulaire difficilement accessible au-dessus du coffrage n'était pas ou peu bloqué. L'intrados visible montre souvent des joints de maçonneries d'épaisseurs très variables, des moellons de dimensions hétérogènes (sans parler de leur qualité). On peut parler ici de malfaçons, car ces techniques étaient déjà très bien maîtrisées.

En revanche, les plus anciens revêtements en béton coffré montrent des défauts inhérents aux techniques de l'époque, beaucoup moins performantes qu'actuellement (dosages imprécis, petites gâchées, reprises nombreuses, manque d'homogénéité).

Dans les tunnels récents, réalisés en béton, et malgré des outils performants, des défauts subsistent comme les vides d'extrados en clé, les ségrégations de matériaux, les déchirures de feuilles d'étanchéité, les ruptures d'anneau localisées. On peut alors également parler de malfaçons.

Maîtrise de l'eau

Un tunnel s'apparente à un drain au sein du massif ; il est donc soumis à des circulations d'eau naturelles, permanentes ou temporaires, parfois agressives vis-à-vis des matériaux.

Dans les ouvrages anciens, les chapes d'étanchéité en mortier et les feuilles métalliques posées sur l'extrados étaient les seules protections contre les venues d'eau. Quelle que soit la qualité de réalisation, leur durée de vie était limitée. Il en est de même du drainage, se résumant à des barbacanes de décharge ou à des massifs drainants.

Les ouvrages plus modernes, au contraire, présentent une panoplie étendue de dispositifs d'étanchéité et drainants (d'origine ou plus tardifs) qui nécessitent à leur mise en place une technicité et un soin bien spécifiques, ainsi qu'un contrôle attentif et, tout au long de la vie de l'ouvrage, un entretien adapté.

5.2.3 Nature des matériaux

Elle est à l'origine de nombreux désordres dans les tunnels anciens revêtus.

Moellons

Les pierres utilisées pour la fabrication des moellons provenaient, dans la mesure du possible, des carrières les plus proches, parfois ouvertes pour cette occasion. Leur qualité mécanique et leur résistance à l'altération étaient très variables. La sélection des pierres se faisait parfois par une exposition d'un an à l'air libre, permettant ainsi l'élimination de « l'eau de carrière », la formation d'un calcin de protection, et l'élimination d'une grande partie des pierres gélives ou trop altérables.

Malgré tout, beaucoup de parements contiennent des pierres provenant du déblai d'excavation (marinage), alors qu'elles auraient dû être réservées au blocage.

Briques

Quand la pierre faisait défaut, les revêtements étaient réalisés en briques si une fabrication industrielle proche existait. Des défauts de cuisson assez fréquents ont entraîné une altération rapide de certaines séries de briques.

Parpaings de béton pleins

Utilisés jusqu'aux années 1940, ces éléments ont bien résisté à l'altération, car préfabriqués avec un matériau plus riche en ciment et moins perméable que les bétons coulés à la même époque. La régularité géométrique de leur assise favorise une bonne répartition des contraintes dans le corps de voûte.

Mortiers

Les liants ont constamment évolué au cours du temps, ainsi que les normes de fabrication des mortiers et bétons. L'avantage des mortiers est leur perméabilité plus grande que les pierres ; ils jouent ainsi un rôle « d'éponge » protecteur des pierres car chemin préférentiel des transferts d'humidité et de vapeur d'eau ; à l'inverse, cette perméabilité les rend plus sensibles aux attaques chimiques qui les dégradent au fil du temps.

Bétons

Certains bétons coffrés anciens ont été complètement altérés au bout de quelques décennies. La cause est à rechercher dans la dissolution des liants, dans l'emploi de granulats inadaptés ou altérables, contenant des minéraux à risque pour la durabilité des liants (pyrite, sulfates), ou dans des dosages peu précis et irréguliers dans un même ouvrage. Les ciments employés étaient parfois très sensibles aux eaux agressives. La vibration des bétons, remplaçant le pilonnage, n'a vraiment été utilisée qu'à partir des années cinquante.

Dans les ouvrages modernes, les problèmes liés à la qualité des bétons et à leur mise en œuvre sont beaucoup moins fréquents.

Étanchéité

Les dispositifs d'étanchement en extradados se sont définitivement imposés aux alentours de 1985 et continuent d'évoluer. Ils sont actuellement appelés dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG).

Auparavant, les rares mises en place de feuilles imperméables avant le bétonnage n'étaient destinées qu'à limiter le lessivage des bétons pendant le coulage dans les zones ruisselantes.

Les voûtes les plus anciennes étaient parfois dotées, à l'extrados de la calotte, de feuilles métalliques enduites de « coaltar » ; ces dispositifs déviateurs des eaux ont permis pendant un certain temps de freiner l'altération des maçonneries.

Les tôles parapluie, toujours utilisées et installées contre l'intrados des voûtes très humides, ne visent qu'à améliorer les conditions de circulation mais ne protègent en rien le revêtement. Elles sont assez fragiles aux chocs de véhicules et masquent l'évolution de la structure de l'ouvrage.

Drainage

Pour les réseaux enterrés, un mauvais choix des matériaux ou des produits manufacturés peut favoriser l'apparition plus rapide des désordres (drains sous-dimensionnés ou fragiles). Un manque de soin évident lors de la pose est très souvent constaté dans les tunnels neufs (ruptures de tuyaux, débris de chantier), ce qui occasionne plus tard de nombreux problèmes de maintenance.

5.3 FACTEURS LIÉS À LA VIE DE L'OUVRAGE

Quelle que soit sa nature, le revêtement est soumis à diverses agressions chimiques au cours de son vieillissement.

Dans un tunnel en service, le trafic a une incidence sur les structures ; ses effets peuvent être permanents, courants, accidentels ou exceptionnels. Ils peuvent se cumuler.

Les modalités d'exploitation peuvent permettre de minimiser les conséquences négatives du trafic, en particulier grâce à une surveillance et un entretien réguliers.

5.3.1 Actions chimiques

On évoque principalement leurs conséquences sur les bétons et les mortiers.

Le béton est un matériau fortement basique sur lequel l'environnement extérieur a une action corrosive acide, généralement véhiculée par l'eau. Des réactions chimiques complexes s'opèrent entre les agents agressifs acides et les hydrates de la pâte du ciment. La forte réserve alcaline du béton lui confère cependant une certaine capacité d'auto-protection contre ce type d'attaque.

La carbonatation

C'est un phénomène de vieillissement naturel bénéfique pour le béton non armé et dommageable pour le béton armé. La forte alcalinité du béton protège les armatures contre la corrosion. La carbonatation faisant baisser le pH du béton, les armatures peuvent alors s'oxyder et provoquer des éclatements superficiels. Dans ce cas précis, la carbonatation devient un facteur de désordre.

Les réactions sulfatiques

Elles sont très répandues dans le milieu naturel et s'avèrent les plus délétères pour les liants et les bétons. Les dégradations proviennent de l'apparition de minéraux expansifs de néoformation (ettringite « secondaire ») qui désagrègent particulièrement les mortiers, mais aussi les bétons.

Les sulfates peuvent être d'origine externe (encaissant, eaux) ou interne (sulfates piégés dans les matériaux constituant ou échauffement excessif pendant la prise).

Le premier cas peut concerner les tunnels anciens non étanchés. L'emploi de ciments avec ajout de laitier (au moins 60 %) ou de ciments « ES » permet une meilleure résistance aux sulfates.

Le second cas est envisageable dans les zones de revêtement très épais (>80cm environ) et donc essentiellement dans les tunnels présentant des hors-profils importants.

L'alcali-réaction

C'est un ensemble de réactions chimiques complexes, au sein du béton, entre certaines formes de silice ou de silicates, pouvant être présentes dans les granulats, et les alcalins du ciment, voire des granulats. Il se forme des produits de réaction (de type gel et/ou cristaux) provoquant l'expansion, la fissuration de la masse du béton, voire des exsudats à la surface libre. Le caractère délétère de ces réactions est fortement augmenté en présence de quantité d'eau importante.

Constatée jusqu'ici sur des ouvrages extérieurs, elle n'a pas été rencontrée en tunnels routiers.

L'action des chlorures

Ils sont présents en ambiance marine, dans les saumures de déverglaçage, mais aussi dans certains adjuvants du béton. Les chlorures libres interviennent directement et de façon agressive dans le processus de corrosion des armatures de béton armé, amorcé par la carbonatation, ainsi que dans la décohésion progressive du béton.

Ce type d'agression peut se rencontrer dans les caissons immergés en mer.

5.3.2 Trafic

Suivant l'importance du trafic de l'itinéraire, les effets induits sont de plusieurs natures.

Effets permanents

Même en présence de ventilation sanitaire, la pollution de l'air et les projections d'eau chargée, en hiver, de sels de déverglaçage, favorisent la corrosion des équipements et du génie civil, si la structure présente des armatures mal enrobées. Les vibrations engendrées par la circulation sur les dalles de chaussée reposant sur appuis provoquent une fatigue et des désordres sur ceux-ci.

On note toutefois que la pollution due au trafic n'altère pas directement le béton.

Effets courants

Les frottements répétés des poids-lourds peuvent avoir des effets non négligeables sur d'anciens revêtements fragiles.

Effets accidentels

Si l'on ne s'intéresse qu'à leur impact sur la structure, les accidents de véhicules les plus préjudiciables pour la sécurité, outre ceux qui sont à l'origine d'un incendie, sont ceux qui affectent les parements décalés (en piédroits) ou les tôles parapluie.

Événements exceptionnels

Certains tunnels, dont le profil en long présente un point bas dans l'ouvrage, peuvent être inondés simplement par une concentration des ruissellements de voirie extérieure que les pompes d'exhaure ne peuvent pas évacuer.

Les incendies sont également des événements exceptionnels et ont des conséquences très variables selon leur importance et leur durée. Sur le plan structurel, ils conduisent à une diminution des caractéristiques mécaniques des matériaux, de la résistance des structures et, suivant les bétons, éventuellement, à un écaillage sur des épaisseurs variables.

5.3.3 Surveillance et entretien

Quelles que soient l'importance de l'itinéraire ou la complexité d'un ouvrage, une surveillance régulière et formalisée doit être appliquée. En effet, le tunnel est un espace confiné dans lequel tout incident peut rapidement prendre des proportions dangereuses pour la sécurité.

Cette surveillance doit s'appliquer aux structures tout autant qu'aux équipements et doit permettre une bonne gestion des opérations d'entretien courant qui concernent, en premier lieu :

- le nettoyage fréquent de la chaussée et des trottoirs,
- le nettoyage des réseaux d'assainissement (fils d'eau, caniveaux et regards),
- le nettoyage des parties visitables des réseaux de drainage.

L'entretien spécialisé (comme les purges préventives, l'hydrocurage des réseaux d'assainissement ou de drainage, ...) est généralement dévolu à des entreprises ; il est déclenché par le gestionnaire selon une périodicité adaptée et/ou en fonction de ce que la surveillance continue a décelé.

On peut malheureusement remarquer que les consignes relatives à la surveillance continue et à l'entretien courant ne sont pas toujours bien respectées. Il en résulte d'abord un danger pour les usagers, puis une dégradation de certaines parties d'ouvrage qui conduit à l'apparition de désordres importants, alors qu'ils auraient pu être évités ou détectés plus tôt.

TABLEAU RÉCAPITULATIF

Le tableau suivant croise les désordres, décrits dans les fiches du « Catalogue des désordres » du CETU, avec les facteurs d'influence évoqués dans ce chapitre. Il permet de constater que la plupart des désordres peuvent avoir plusieurs origines (notées +), le facteur prépondérant éventuel étant distingué (noté ++).

Liste des désordres	N° de fiche	Facteurs d'influence							
		Site			Construction			Vie de l'ouvrage	
		Massif rocheux encaissant	Action de l'eau	Environnement	Conception	Réalisation	Nature des matériaux	Exploitation	Surveillance Entretien
Désordres liés à l'eau									
Venues d'eau	HY-1	++	++	+			+		
Concrétions	HY-2	+	++	+					
Effets du gel	HY-3		++	+			++		
Efflorescences sur mortiers et bétons	HY-4	+	++				+		
Désordres de la zone d'influence									
Karsts et cavités	ZI-1	++	+						
Désordres aux têtes	ZI-2	+	+	+		+			+
Instabilités de versants	ZI-3	++	+						
Désordres des tronçons non revêtus									
Blocs ou masses lâchés	NR-1	++	+	+		+			+
Plaques ou bancs fléchis	NR-2	++	+	+		+			+
Altérations des matériaux constitutifs des revêtements									
Revêtements de maçonnerie de moellons ou de briques									
Alvéolisation	RM-1		+	+			++		
Desquamation	RM-2		+	+			++		
Exfoliation	RM-3		+				++		
Écaillage mécanique	RM-4	++				+	+		
Altérations des mortiers – Déjointoiement	RM-5		++	+	+	+	++		
Altérations des matériaux constitutifs des revêtements									
Revêtements de béton (coulés en place ou préfabriqués)									
Épaufrures	RB-1			+		+		++	
Altérations des bétons – Gonflements	RB-2		++	+		+	+		
Écaillage mécanique	RB-3	++				+			
Éclatements sur armatures	RB-4		++		+	+			
Désordres des bétons projetés	RB-5	+	+			+			

Liste des désordres	N° de fiche	Facteurs d'influence							
		Site			Construction			Vie de l'ouvrage	
		Massif rocheux encaissant	Action de l'eau	Environnement	Conception	Réalisation	Nature des matériaux	Exploitation	Surveillance Entretien
Désordres des dispositifs d'étanchéité et de drainage									
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 cuvelage 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 affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage									
Fissures									
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					++			
Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage									
Déformations									
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	+	+			+	+		
Désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage									
Désordres liés à la mise en œuvre									
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					++	+		
Désordres des équipements de génie civil									
Désordres sur les chaussées	EQ-1	+	+			+	+	+	+
Désordres des dalles et des cloisons	EQ-2				+	+		+	
Désordres liés aux incendies									
Désordres dus aux incendies	IN-1				+		+	+	+
Désordres liés à des défauts d'entretien									
Défauts d'entretien	EN-1							+	++

L'ANALYSE DES DÉSORDRES

L'analyse de l'état d'un ouvrage ou de l'une de ses parties doit pouvoir répondre aux quatre questions suivantes (d'après les recommandations de l'AFTES) :

- Quelles sont les causes des désordres ?
- Comment les désordres peuvent-ils évoluer ?
- Quel est le degré d'urgence des actions à entreprendre ?
- Quels investigations, études ou travaux faut-il prévoir ?

Après l'observation et le levé des désordres, l'analyse menant au diagnostic comporte les étapes suivantes :

- le pré-diagnostic, qui doit lister les hypothèses sur les causes des désordres et apporter les premiers éléments de réponses ;
- l'identification de la pathologie, qui permet de hiérarchiser les conséquences pour la structure et pour les usagers ;
- le diagnostic proprement dit, basé sur l'ensemble des reconnaissances et études et qui conduit à définir, s'il y a besoin, un mode de réparation adapté.

6.1 PRÉ-DIAGNOSTIC

Le pré-diagnostic s'appuie sur la connaissance apportée par l'étude exhaustive de tous les documents disponibles et sur les constatations effectuées dans l'ouvrage. Pour des cas simples, il peut déjà répondre aux questions que le diagnostic aura à traiter. Dans les cas plus complexes, des investigations complémentaires seront nécessaires afin de lever les incertitudes.

Le pré-diagnostic doit permettre de mettre en évidence des « zones » dans le tunnel. Une zone caractérise une section homogène au regard de la nature et de la gravité des désordres qui affectent la structure. Les zones « sensibles »,

c'est-à-dire des secteurs dont l'état fait craindre l'apparition ou l'aggravation rapide de désordres, peuvent alors donner lieu à une surveillance renforcée (au sens de l'ITSEOA) ou à des investigations complémentaires comme évoquées ci-avant.

Ce découpage en zones a l'avantage, dès le pré-diagnostic, de focaliser l'attention du gestionnaire et des équipes d'inspection sur les secteurs du tunnel les plus délicats.

6.2 IDENTIFICATION DES PATHOLOGIES ET DE LEURS ÉVOLUTIONS

Les pathologies des tunnels découlent très souvent d'une association de désordres, plus rarement d'un seul d'entre eux. Ces désordres ont pu se cumuler et interagir au fil du temps, aggravant lentement une situation que des éventuelles réparations fragmentaires n'ont pas réussi à améliorer. On peut distinguer :

- des pathologies « d'origine », c'est-à-dire issues du mode de construction et de la mauvaise qualité des matériaux mis en œuvre ;
- des pathologies « induites » par différents facteurs d'altération ou par des actions postérieures à la construction.

Une évolution de l'ouvrage a pu être déjà remarquée par le gestionnaire et l'a conduit à déclencher une inspection détaillée. Si, au cours de celle-ci, sont découverts des désordres jamais signalés auparavant, les hypothèses d'évolution à ce stade ne peuvent être qu'intuitives et fondées sur l'expérience. Suivant la gravité des désordres constatés et lorsque la sécurité n'est pas immédiatement menacée, une période d'observation et, si possible, de mesures permettra de quantifier une vitesse d'évolution, précisant ainsi le diagnostic final.

À la fin d'une inspection détaillée, deux situations sont donc possibles :

- le problème de l'ouvrage est clairement cerné et le pré-diagnostic suffit à établir un diagnostic fiable qui sera validé avec le maître d'ouvrage ;
- les causes des désordres n'apparaissent pas clairement et la situation est néanmoins préoccupante ; il manque des informations pour parvenir à un diagnostic précis ; le maître d'ouvrage gestionnaire, conseillé par des spécialistes, décide alors des investigations complémentaires à réaliser pour confirmer les pathologies soupçonnées à l'issue du pré-diagnostic ; une liste de techniques d'investigation et d'essais est fournie en **annexe 7**.

Il est donc important de ne pas interpréter les désordres isolément mais de les confronter dans le cadre de plusieurs systèmes d'hypothèses prenant en compte tous les paramètres.

6.3 DIAGNOSTIC FINAL

Le diagnostic final peut intervenir plusieurs années après l'inspection, si des reconnaissances ou des études préalables ont été nécessaires. Il doit intégrer les causes des pathologies mises en évidence, leur vitesse d'évolution, les risques induits. Il n'est établi que lorsque l'ensemble des phénomènes observés dans le tunnel ont été identifiés et compris. Si des pathologies clairement identifiées se dégagent, il conviendra d'en hiérarchiser les conséquences (danger pour les usagers ou les riverains, risques pour les structures).

Le tronçonnage du tunnel (voir chapitre 7) permet de croiser les désordres observés avec les différentes structures composant le tunnel. Des corrélations peuvent alors apparaître entre certains tronçons et des zones où se concentrent les mêmes types de désordres.

Le diagnostic final doit, dans ses conclusions, tenter de dégager les principaux facteurs responsables des désordres. Dans les cas les plus complexes, le diagnostic peut faire état de différentes hypothèses en les argumentant. Il doit permettre de concevoir ensuite le projet de réparation ou de réhabilitation en toute connaissance de cause.

Des exemples de pathologies sont présentés, ci-après, pour plusieurs types de revêtements. Ils donnent un cadre pour mener une démarche d'identification et d'analyse.

6.4.1 Cas des excavations non revêtues

Les réseaux routiers comportent quelquefois des tunnels (ou des tronçons de tunnel) non revêtus. Si le type de désordre est clairement défini (chute de blocs au sens large), sa prédiction est parfois difficile. De plus, ce type de désordre représente l'un des risques majeurs pour les usagers.

Les terrains évoluent souvent par à-coups, provoquant des chutes de grandes masses, particulièrement dans les roches dures bien structurées. Une étude géologique et structurale spécifique peut aider à cerner le potentiel de risque.

Pré-diagnostic
Paramètres défavorables à l'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Discontinuités nombreuses • Présence d'argile • Roche altérable
Pathologies d'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Culots de tir instables • Purge incomplète (y compris en cas d'alésage ultérieur)
Identification des pathologies et de leurs évolutions
Pathologies induites
<ul style="list-style-type: none"> • Décohésion des roches • Blocs lâchés • Bancs fléchis
Risques
<ul style="list-style-type: none"> • Chute de masses plus ou moins volumineuses
Evolution
<ul style="list-style-type: none"> • Poursuite de la décohésion du massif s'il n'y a pas de renforcements
Investigations complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> • Étude géologique et géotechnique
Diagnostic final
Analyse
<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des causes des pathologies mises en évidence, de leur vitesse d'évolution et des risques induits • Hypothèses sur les principaux facteurs responsables des désordres
Remèdes
<ul style="list-style-type: none"> • Purges • Renforcements (boulons, béton projeté...) associés aux opérations de purges

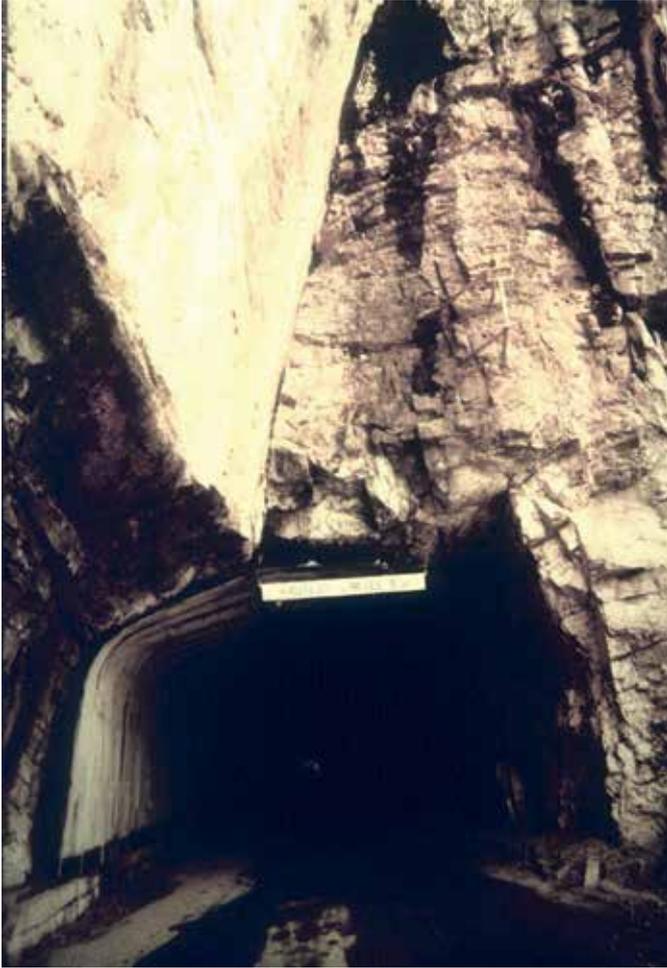


Figure 14a : état lors de la première inspection



Figure 14b : état trois ans plus tard

Figure 14 : chute de masses rocheuses (ces deux illustrations montrent la difficulté d'estimer la stabilité de grandes masses rocheuses : la première inspection n'avait pas décelé de risque immédiat, sauf pour la partie inférieure de la masse tombée ; il est en fait tombé environ 100 m³).

6.4.2 Cas des excavations revêtues

Revêtements en maçonnerie

Ce type de revêtement cumule des désordres de différentes natures, compliquant souvent le diagnostic des pathologies. Les plus mauvaises maçonneries ont progressivement disparu ou ont été remplacées. D'autres qui subsistent encore atteignent parfois un tel degré d'altération, malgré des réparations périodiques, qu'il serait illusoire de vouloir les prolonger encore longtemps.

Par ailleurs, les tunnels en maçonnerie sont souvent de petite section, ce qui en fait des secteurs d'étranglement sur les

itinéraires d'importance. Les réparations immédiates peuvent se limiter à ce qui est strictement nécessaire pour la sécurité si une réfection totale, incluant en particulier une augmentation de la section transversale, est rapidement programmée.

En revanche, s'il n'y a aucune contrainte de trafic ou de gabarit et si le terrain n'est pas en cause, on peut maintenir les maçonneries en état par des techniques simples (rejointement, injection de régénération, ...).

Pré-diagnostic
Paramètres défavorables à l'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Terrain évolutif mal pris en compte à la réalisation
Pathologies d'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise qualité de l'appareillage, des moellons et/ou des mortiers • Mauvais blocage du revêtement (vides, boisages)
Identification des pathologies et de leurs évolutions
Pathologies induites
<ul style="list-style-type: none"> • Altération des mortiers entraînant déjoints et fragilisation • Déformations du revêtement, particulièrement dans les profils en ogive • Écaillage mécanique si le revêtement est mis en contrainte par l'évolution du terrain
Risques
<ul style="list-style-type: none"> • Chocs et frottements de poids-lourds (déformation locale réduisant le gabarit) • Dans le cas d'écaillage mécanique, chute potentielle de morceaux de moellons sur les usagers • Ruine de l'ouvrage
Evolution
<ul style="list-style-type: none"> • Développement des expressions des pathologies induites (évolution généralement lente et peu apparente sur les maçonneries souvent sales) • Création de nouveaux désordres suite à des réparations inadaptées
Investigations complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles visuels plus fréquents dans les zones identifiées comme fragiles • Forages destructifs courts (3 m environ) suivis d'une endoscopie • Mesures de contraintes au vérin plat (si de l'écaillage est décelé)
Diagnostic final
Analyse
<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des causes des pathologies mises en évidence, de leur vitesse d'évolution et des risques induits • Hypothèses sur les principaux facteurs responsables des désordres
Remèdes
<ul style="list-style-type: none"> • Maçonnerie peu dégradée : drainage et rejointement • Maçonnerie très dégradée et/ou déformée : ancrages, reconstruction localisée, injections...

Revêtements en béton non armé

Pré-diagnostic
Paramètres défavorables à l'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Terrain évolutif mal pris en compte à la réalisation
Pathologies d'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Bétons très anciens : généralement hétérogènes et peu compacts, leur perméabilité favorise des altérations profondes qui mettent parfois en danger les structures les plus minces • Bétons plus récents (non étanchés) : hormis une fissuration de retrait traversante pouvant se révéler pathologique car favorisant les venues d'eau, ils ne montrent aucune autre pathologie très dangereuse • Mauvaise conception de joints de bétonnage • Désordres liés aux feuilles d'étanchéité : ils peuvent, à long terme, affecter la stabilité de certains anneaux (zones sonnant le creux plus ou moins étendues) • Mauvais clavage • Nids de cailloux et autres défauts de bétonnage • Béton soumis au gel-dégel, parfois dès la prise • Mauvaise tenue de réparations localisées ou anciennes • Altération par projection des sels de déverglaçage (en particulier en base de piédroits)
Identification des pathologies et de leurs évolutions
Pathologies induites
<ul style="list-style-type: none"> • Attaques chimiques liées aux venues d'eaux agressives, d'autant plus délétères que le béton est perméable • Actions du terrain encaissant rapidement matérialisées par des fissures ou des écaillages qui peuvent indiquer le mode de déformation de la structure • Fragilisation ou rupture par chocs • Décollement de ragréages
Risques
<ul style="list-style-type: none"> • Chute d'éléments ou de débris de béton altéré • Ruptures locales de la voûte
Évolution
<ul style="list-style-type: none"> • Développement des expressions des pathologies induites (évolution généralement lente mais pouvant être brutale si la surveillance n'a pas identifié les instabilités) • Création de nouveaux désordres suite à des réparations inadaptées
Investigations complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des déformations (fissurométrie, convergence, nivellement) • Mesures des épaisseurs des matériaux de revêtement et de soutènement (radar, impact-echo couplés à des contrôles destructifs) • Profilométrie • Forages de reconnaissance, fenêtres • Mesures de contraintes (vérin plat) • Essais de laboratoire (analyses de béton, d'eau...)
Diagnostic final
Analyse
<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des causes des pathologies mises en évidence, de leur vitesse d'évolution et des risques induits • Hypothèses sur les principaux facteurs responsables des désordres
Remèdes
<ul style="list-style-type: none"> • Réparations ponctuelles sur certains désordres limités (zones gelées, venues d'eau ponctuelles, désordres spécifiques de joints entre anneaux, ...) • Traitement de la totalité du revêtement pour les bétons anciens atteints d'une altération généralisée d'origine chimique (ce type de dégradation n'a pas été rencontré à ce jour dans les bétons récents) • Renforcement, éventuellement lourd, du revêtement fracturé (ce remède peut être insuffisant si la rupture est due à la poussée du terrain)

Revêtements en béton armé

Pré-diagnostic
Paramètres défavorables à l'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Terrain évolutif mal pris en compte à la réalisation
Pathologies d'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Armatures trop proches du coffrage (béton coulé en place) • Nids de cailloux et autres défauts de bétonnage • Béton soumis au gel-dégel, parfois dès la prise • Désordres liés aux feuilles d'étanchéité • Mauvais clavage • Mauvaise tenue de réparations localisées ou anciennes
Identification des pathologies et de leurs évolutions
Pathologies induites
<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion des armatures et éclatements du béton • Fragilisation ou rupture par chocs • Décollement de ragréages • Attaques chimiques liées aux venues d'eaux agressives, d'autant plus délétères que le béton est perméable • Actions du terrain encaissant rapidement matérialisées par des fissures ou des écaillages qui peuvent indiquer le mode de déformation de la structure
Risques
<ul style="list-style-type: none"> • Chute d'éléments, de parties d'éléments ou d'écaillures sur la chaussée
Evolution
<ul style="list-style-type: none"> • Développement des expressions des pathologies induites (évolution prévisible si la surveillance est bien conduite) • Création de nouveaux désordres suite à des réparations inadaptées
Investigations complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des déformations (fissurométrie, convergence, nivellement, profilométrie) • Mesure de l'enrobage, mesure de la profondeur de carbonatation • Mesure de la corrosion des armatures et reprise des notes de calculs pour s'assurer qu'elle ne remet pas en cause la résistance minimale de la structure affectée (cas des corbeaux d'appui de dalle de ventilation, par exemple) • Essais de laboratoire (analyses de béton, d'eau...)
Diagnostic final
Analyse
<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des causes des pathologies mises en évidence, de leur vitesse d'évolution et des risques induits • Hypothèses sur les principaux facteurs responsables des désordres
Remèdes
<ul style="list-style-type: none"> • Purge des éclats de béton • Passivations des armatures • Ragréage • Réparations ponctuelles sur certains désordres limités (zones gelées, venues d'eau ponctuelles, désordres spécifiques de joints entre anneaux, ...)

Revêtements en béton projeté

Pré-diagnostic
Paramètres défavorables à l'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Terrain évolutif mal pris en compte à la réalisation
Pathologies d'origine
<ul style="list-style-type: none"> • Épaisseurs insuffisantes ou irrégulières pouvant conduire à des instabilités • Mauvais enrobage des treillis soudés ou teneur en fibres insuffisante • Béton soumis au gel pendant la prise
Identification des pathologies et de leurs évolutions
Pathologies induites
<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux décollés par gonflement des terrains ou par le gel • Fissuration de retrait excessive générant des plaques instables • Éclatements localisés au droit d'éléments métalliques oxydés • Fragilisation ou rupture par chocs • Décollement de ragréages • Attaques chimiques liées aux venues d'eaux agressives, d'autant plus délétères que le béton est perméable • Actions du terrain encaissant rapidement matérialisées par des fissures ou des écaillages qui peuvent indiquer le mode de déformation de la structure
Risques
<ul style="list-style-type: none"> • Revêtement mince et non armé : rupture très rapide en cas de gonflement du terrain • Chute d'éléments, de parties d'éléments ou d'écaillages sur la chaussée
Evolution
<ul style="list-style-type: none"> • Développement des expressions des pathologies induites (évolution prévisible si la surveillance est très attentive) • Création de nouveaux désordres suite à des réparations inadaptées
Investigations complémentaires
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des déformations (fissurométrie, convergence, nivellement, profilométrie) • Mesure de l'épaisseur du revêtement • Contrôle de la présence des armatures (fibres ou treillis) • Essais de laboratoire (analyses de béton, d'eau...)
Diagnostic final
Analyse
<ul style="list-style-type: none"> • Présentation des causes des pathologies mises en évidence, de leur vitesse d'évolution et des risques induits • Hypothèses sur les principaux facteurs responsables des désordres
Remèdes
<ul style="list-style-type: none"> • Purge des écaillages • Passivation des armatures ou ragréage si béton projeté armé • Réfection avec drainage amélioré et, si besoin, consolidation du terrain encaissant avec des boulons

Cas particulier des venues d'eau :

Elles peuvent nécessiter d'être traitées, quelque soit le type de revêtement, soit parce qu'elles ont un effet néfaste sur la structure, soit pour des raisons liées à la sécurité des usagers ou aux contraintes d'exploitation qu'elles engendrent.

L'exemple du tunnel-canal de Condes (Haute-Marne) constitue une bonne illustration de la manière dont peut être établi un diagnostic conduisant à un mode de réparation adapté à la pathologie dont souffrait ce tunnel.

Les problèmes rencontrés dans cet ouvrage ne sont pas spécifiques aux tunnels canaux, mais peuvent se rencontrer dans tous les tunnels dont les structures sont similaires.

6.5.1 Présentation de l'ouvrage

Situé sur le canal de la Marne à la Saône, le tunnel se trouve à 4 km au nord de Chaumont (Haute-Marne). Construit en 1884 en section divisée, il franchit une colline sous une couverture moyenne de 20 m. Les terrains traversés sont des calcaires bathoniens en bancs horizontaux, épais, homogènes et durs.

Le tracé en plan est rectiligne et la longueur de l'ouvrage est de 308 m. Le profil en travers de la partie supérieure de la voûte est celui d'une ellipse à axe horizontal de 16 m et axe vertical de 5,15 m. Elle repose sur des piédroits courbes, de 5,34 m de rayon, situés en majeure partie sous le plan d'eau du canal. Un radier contre voûté (rayon de 22,50 m) ferme ce profil sur toute la longueur du tunnel. La passe navigable est de 11 m.

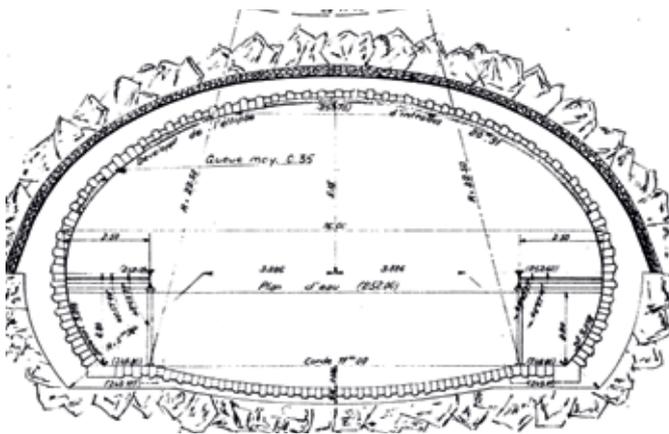


Figure 15 : profil en travers du tunnel de Condes
(document d'archive)

Le revêtement est constitué par une maçonnerie de moellons de calcaire oolithique dont l'épaisseur varie de 1 m en clé à 1,50 m en naissance (données d'archive). Le radier a une épaisseur supposée de 0,50 m.

6.5.2 Investigations et auscultation

Première inspection détaillée (mars 1988)

L'éclairage du tunnel, situé au dessus des deux passerelles latérales, laissait nettement percevoir une altération quasi généralisée des moellons de voûte et de piédroits.

Une première inspection détaillée de la voûte hors d'eau a eu lieu en mars 1988. Cet examen visuel confirmait une altération plus ou moins importante des parements, déjà signalée dès 1910. Des parties de moellons semblaient tomber régulièrement créant des cavités dans le revêtement. Il s'agissait, en première approche, d'une exfoliation des pierres aussi bien intensive (en profondeur) qu'extensive (en surface). On remarquait aussi que ces désordres étaient présents en tous points de l'intrados. En revanche, aucun autre désordre n'était visible, qu'il s'agisse de fissuration ou de déformation importante. Le radier n'a pas été inspecté (difficulté de vider le bief, forte épaisseur de vase).

Compte tenu de la forme très surbaissée de la voûte, de son épaisseur (donc de son propre poids), de la présence de bancs calcaires horizontaux au dessus du tunnel, on suspecte l'éventualité de fortes contraintes au sein de la maçonnerie pouvant provoquer localement l'écaillage mécanique des pierres.

Seconde inspection détaillée (octobre 1994)

Cette seconde inspection détaillée s'est déroulée en octobre 1994. La vidange du bief ainsi que son dévasage à l'aide d'une haveuse avaient permis d'inspecter une partie des piédroits immergés et du radier.

En voûte, l'extension latérale des altérations de pierres était très nette mais la profondeur des cavités ne dépassait pas 25 cm.

Les piédroits situés sous les passerelles étaient revêtus d'un enduit de ciment en très bon état bien que marqué par des décollements et quelques fissures sans relation avec des désordres de la partie supérieure. Les rares parties de radier découvertes montraient aussi un enduit superficiel en bon état et sans signe de fissuration ou de rupture. Les parties immergées étaient, dans leur ensemble, en bien meilleur état que les parties à l'air libre.

Auscultations

En 1994, quatre profils de convergence à 5 repères étaient installés dans le tunnel afin de déceler une éventuelle déformation lente du profil.

Quatre campagnes de mesures ont été réalisées (octobre 1994, février, juin et octobre 1995) afin de mettre en évidence le comportement saisonnier du revêtement et un éventuel processus de déformation.

La première année de mesures permettait seulement le constat de la « respiration » saisonnière des bases variant entre -0.4 et + 0.6 mm, ce qui était peu pour une voûte de cette ouverture.

Les quatre campagnes de mesures confirmaient l'absence de déformation.

En décembre 1995, une campagne de 30 sondages carottés et endoscopés a été réalisée en voûte afin de reconnaître l'état du corps de maçonnerie.

L'épaisseur moyenne du revêtement constatée dans les sondages était de 0,60 m en naissance, 0,70 m en rein et 0,80 m en clé. Malgré des résistances à la compression (R_c) voisines de 40 MPa, les moellons présentaient un feuilletage visible en profondeur.

Le terrain était rencontré à une profondeur de 1 à 2 m. L'espace annulaire était comblé par un blocage lié de mortier dans lequel du coulis verdâtre était visible. Les vides résiduels étaient de l'ordre de 0,20 m. Le profil d'excavation semblait très irrégulier du fait des hors profils latéraux liés à la stratification horizontale. Le calcaire en place était solide (R_c supérieure ou égale à 25 MPa).

En conclusion, malgré des épaisseurs réelles inférieures aux données d'archives, le revêtement était assez homogène sur toute son épaisseur.

En septembre 2000, une cinquième campagne de mesures était demandée par l'exploitant. Le résultat confirmait la stabilité de la voûte : aucune variation de longueur de base n'avait dépassé le millimètre en cinq ans.

6.5.3 Diagnostic

Les mesures de convergences ont permis d'éliminer l'hypothèse d'une déformation du profil par écrasement. En effet, si de fortes contraintes avaient généré de l'écaillage mécanique, celui-ci se serait manifesté en des points particuliers du profil en travers (en l'occurrence, les naissances) alors que les inspections avaient constaté une répartition quasi homogène des désordres.

Le problème du tunnel résidait donc essentiellement dans la mauvaise qualité des moellons. La perte de matière introduisait d'abord un risque pour les usagers du tunnel, mais pouvait aussi affaiblir le revêtement dans le cas d'une cavité importante se propageant au delà du premier rouleau de moellons (35 cm). Sur ce dernier point, le problème avait été cerné et des solutions adaptées avaient déjà été mises en œuvre, à savoir :

- « rocaillage » du parement en tête Nord (enduit ciment), toujours présent et stable ;
- injections de « lait de ciment » en 1914 et 1958 : sans utilité au niveau du parement, les injections avaient comblé une partie des vides et consolidé le corps de maçonnerie assurant sa bonne conservation (confirmée par les sondages).

6.5.4 Projet de réfection

Le principe de réparation proposé a été celui d'une coque en béton projeté armé de treillis soudé, régnant sur tout l'intrados à l'air libre et connectée au revêtement. Elle devait permettre à la fois de sécuriser le passage et de stopper l'altération des pierres.

6.5.5 Travaux

Première tranche (en 2002, entre les PM150 et PM205)

Les travaux ont consisté en :

- la purge des exfoliations sur une épaisseur maximale de 10 cm,
- la projection de béton afin de combler les cavités déjà exfoliées,
- la pose et l'épinglage d'un treillis soudé sur toute la voûte,
- la projection de béton par voie sèche (épaisseur 5 cm).

A titre d'essai, un anneau expérimental a été réalisé, entre les PM175 et PM181, en béton projeté fibré sans treillis soudé.

Seconde tranche (en 2003, entre les PM50 et PM150, entre les PM205 et PM308)

Les travaux ont consisté en :

- la purge des exfoliations sur une épaisseur maximale de 10 cm,
- la projection de béton afin de combler les cavités déjà exfoliées,
- la pose et l'épinglage d'un treillis soudé en partie supérieure de la voûte sur 10 m de développée,
- la projection de béton avec fibres métalliques (épaisseur 5 cm).

6.5.6 Conclusion

A la suite des travaux de chemisage, une inspection détaillée réalisée en 2004 a fixé le nouveau « point zéro » de la surveillance.

Les coques réalisées ont actuellement une très bonne tenue. L'anneau armé de fibres métalliques ne présente aucun désordre particulier qui pourrait être lié à l'absence de treillis soudé.

Aucune évolution anormale n'est constatée à ce jour.

COMMENT CONDUIRE UNE INSPECTION DÉTAILLÉE

7.1 COMMENT PRÉPARER L'INSPECTION

Le développement qui suit s'applique surtout aux tunnels creusés. Il convient cependant pour tous les types de tunnels quels que soient leur mode de construction ou leur destination (routes, voies ferrées, canaux).

7.1.1 Programmation

La période d'intervention sur site est fixée d'un commun accord entre les parties car de nombreux paramètres entrent en jeu (trafic, saison, travaux programmés, entretien, type de balisage, ...). En particulier, les périodes permettant la fermeture totale du tube à la circulation pendant l'inspection sont à privilégier.

7.1.2 Étude des documents existants

Cette première étape est indispensable. Il faut «apprendre» le tunnel avant d'y entrer !

L'inspecteur doit prendre connaissance de l'ouvrage par un examen préalable approfondi des archives ou documents qui lui sont communiqués (méthodes de construction, réparations, inspections antérieures, surveillances particulières, mesures et constats de toutes natures, synthèses ou monographies). En particulier, le rapport de l'inspection précédente doit être attentivement analysé.

Dans le cas d'une inspection détaillée initiale ou après des travaux de renforcement importants, le maître d'ouvrage responsable des travaux est le responsable du découpage structurel de l'ouvrage (tronçonnage), reposant sur la géologie, le soutènement, l'étanchéité, les revêtements. À ce stade, il est déjà possible de cerner les tronçons qui ont posé problème à la construction ou lors des réparations. L'inspecteur doit en prendre connaissance et les considérer comme des points singuliers devant faire l'objet d'une attention particulière lors de l'inspection.

Il arrive parfois que le découpage en tronçons ne soit pas effectué au moment de la remise des documents à l'inspecteur. Il doit alors en faire la demande auprès du maître d'ouvrage. En ce qui concerne les tunnels sur le réseau routier national non concédé, le maître d'ouvrage peut solliciter l'appui du Centre d'études des tunnels pour réaliser le découpage. Un exemple de découpage par tronçons est donné en **annexe 8**.

Dans le cas d'un tunnel neuf relativement complexe, dont le dossier d'ouvrage peut ne pas être constitué lors de l'inspection détaillée initiale, une visite préliminaire peut s'avérer nécessaire, afin de rencontrer le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre constructeurs, mais aussi :

- de définir précisément les parties d'ouvrage relevant de l'opération d'inspection ;
- d'estimer la charge de travail et les moyens à mettre en œuvre ;
- d'intégrer les contraintes de sécurité imposées par le responsable de la coordination en matière de sécurité et de protection de la santé sur le chantier ;
- de rassembler une connaissance fondée sur des plans d'exécution et sur la mémoire des intervenants.

Dans le cas d'un tunnel déjà inspecté, il est important de consulter les pièces relatives aux éventuels travaux réalisés depuis l'inspection précédente, ainsi que les bilans annuels d'événements. Ceux-ci peuvent alerter par une répétition d'incidents significatifs. De même, des tronçons sensibles, relevant d'un régime de surveillance adapté, ont pu déjà être identifiés sans que leur gravité n'ait été de nature à entraîner des actions à court terme.

7.1.3 Travaux préparatoires

Travaux dévolus à l'inspecteur

L'inspecteur doit s'assurer que les documents en sa possession lui permettent d'élaborer les fonds de plans précis destinés au levé des désordres. Il les réalise sous un format informatique et, lorsque les levés sur site se font sur un support papier, les édite à une échelle supérieure ou égale au 1/100ème. Le format des plans doit permettre leur manipulation aisée dans des conditions pas toujours faciles (milieux humides et ventilés).

Travaux dévolus aux services organisationnels et opérationnels

Le service organisationnel doit s'assurer de la présence du marquage décimétrique indispensable du tunnel (et des ouvrages annexes s'il y a lieu) ou, sinon, demander sa mise en place (ou son rafraîchissement) avant l'inspection. L'annexe 9 précise les modalités de ce marquage.

Le service opérationnel doit faciliter le libre accès à toutes les parties de l'ouvrage concernées par l'inspection, aussi bien les sections circulées que les gaines de ventilation ou les réseaux d'assainissement et de drainage. Aucune intervention lourde d'entretien ou de lavage ne doit être programmée en même temps que l'inspection détaillée périodique. Dans la mesure du possible, la dépose de tout ou partie des parements rapportés (ou habillages) est à réaliser par le service gestionnaire avant toute inspection.

7.2 COMMENT RÉALISER L'INSPECTION

Pour les tunnels non routiers, les indications qui suivent ne diffèrent que par les moyens matériels permettant d'atteindre la voûte : plateforme et nacelle sur wagon spécialisé (tunnels ferroviaires), barge équipée d'échafaudage (tunnels canaux).

7.2.1 Les moyens, les outils

L'éclairage

L'éclairage installé dans les tunnels est insuffisant pour permettre de bonnes observations, en particulier en calotte. Il est donc indispensable de se munir d'un éclairage complémentaire le plus puissant possible. Celui-ci doit permettre d'illuminer une assez grande partie du revêtement : l'observation et le dessin y gagnent en précision, mais aussi le diagnostic.

Pour le travail au sol dans des tunnels peu ou pas éclairés ou dans des galeries inaccessibles à un véhicule, il est très utile d'avoir un petit groupe électrogène, muni de plusieurs projecteurs, le tout monté sur un châssis mobile.

Dans les espaces relativement exigus, comme les gaines de ventilation, l'emploi d'un moteur thermique peut être malaisé et source de pollution. Dans ce cas, l'examen se fait uniquement à l'aide d'un éclairage portatif (lampes frontales, torches, sac à dos muni de projecteurs sur batteries).

Lorsque l'examen s'effectue depuis une plate-forme élévatrice mobile de personnes (PEMP), il est conseillé de disposer des projecteurs d'ambiance assez éloignés du poste d'observation,



Figure 16 : sac à dos munis de projecteurs

La plateforme élévatrice mobile de personnes (PEMP)

Cet engin est indispensable car il faut aller au contact de la voûte et ne pas se contenter de l'examiner depuis la chaussée.

Le type d'engin est à choisir avec attention car il conditionne la qualité et la rapidité de l'inspection. En effet, l'inspection d'une voûte ne se fait pas à partir de points fixes régulièrement répartis, mais par une observation en continu, à la recherche des désordres. Il est donc particulièrement important que l'engin puisse se déplacer lentement en position dépliée.

Suivant la standardisation adoptée par les organismes de contrôle réunis, il existe trois types de PEMP :

- les PEMP de type 1 : elles sont posées sur remorque ou véhicule porteur et utilisées à poste fixe (stabilisateurs au sol) ; le porteur ne peut rouler que si les bras de la plateforme sont repliés ;
- les PEMP de type 2 : elles sont posées sur véhicule porteur, pouvant se déplacer avec la plateforme en position élevée (stabilisateurs repliés) ; la conduite du porteur n'est pas assurée par l'agent situé en plateforme ;
- les PEMP de type 3 : elles sont posées sur châssis ou base automotrice dont le déplacement en translation est commandé depuis la plateforme, quelle que soit sa position en élévation.

Les PEMP sont également divisés en deux catégories :

- la catégorie A : elle est constituée des PEMP qui ne peuvent s'élever qu'à la verticale de leur base ;
- la catégorie B : elle regroupe les nacelles à tourelle et à bras articulés ou télescopiques qui permettent par rotation de balayer, dans toutes les directions, un espace plus étendu.

S'agissant d'ouvrages linéaires, une PEMP de type 1 ne convient pas au travail d'inspection des tunnels.

Un engin de type 2 garantit une meilleure autonomie des équipes sur site car il peut circuler sur la route comme un véhicule normal. Cependant, ce type d'engin n'est pas courant.

Un engin de type 3 se trouve couramment en location en toute région. À l'usage, il s'avère nécessaire d'avoir un conducteur à côté de l'inspecteur, afin que ce dernier se concentre sur l'observation et non sur le pilotage.

L'examen de toutes les parties constitutives des tunnels nécessite un déport latéral de la nacelle qui n'est possible qu'avec un engin à tourelle, donc de catégorie B (têtes, parties de voûtes situées au-dessus de zones non circulables, ...).

À la vue de ces considérations, une plateforme élévatrice de personnes de catégorie 2B ou 3B, associant un système d'éclairage performant, est l'outil le plus efficace en terme d'autonomie et de rendement pour l'inspection des tunnels routiers.

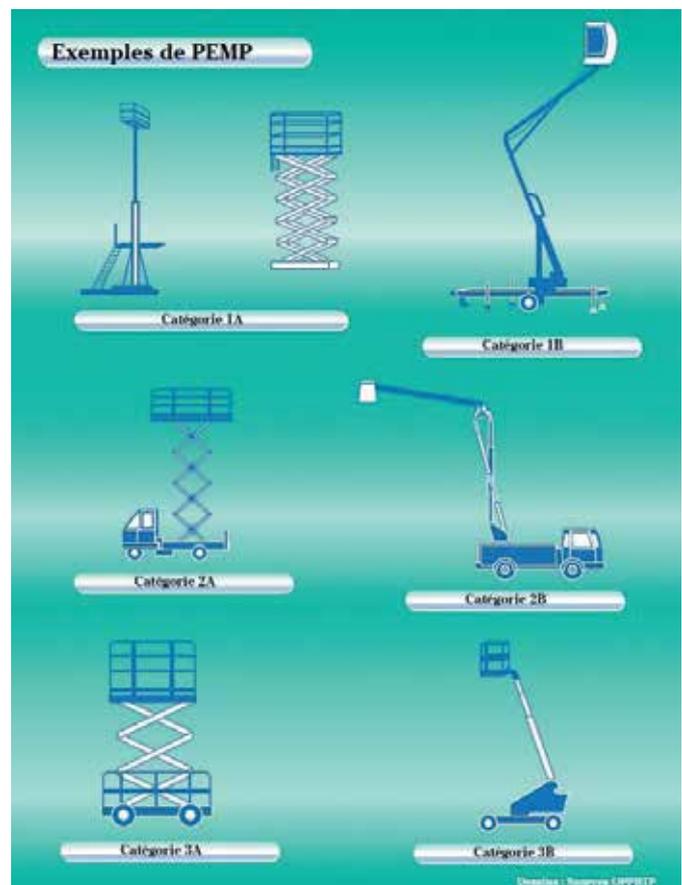


Figure 17 : catégories de PEMP suivant la recommandation R386 de la CNAMTS [source : OPPBTJ]

Lors du choix de la PEMP, il faut s'assurer qu'elle correspond effectivement aux besoins de l'inspection (charge utile,

capacités de hauteur et de déport...) et à l'environnement de travail (stabilité du sol, dévers longitudinal et latéral...).



Figure 18a : camion-nacelle du CETU (PEMP de type 2B) équipé de projecteurs



Figure 18b : nacelle de type 3B

Figures 18 : différents types de nacelles employées pour l'inspection des tunnels

Le marteau

Cet outil permet de sonder n'importe quelle roche ou matériau de revêtement. Par l'écoute des sons, creux ou non, émis par les matériaux, le martelage met en évidence des désordres non décelables à l'œil nu (vides, défauts de compacité, dureté des joints, ...). Il ne faut pas craindre de «démolir» quelque peu pour évaluer la profondeur d'une dégradation. Son utilisation fait partie intégrante du processus d'inspection.

Malgré tout l'empirisme qui s'attache au martelage, cette pratique rapide et peu coûteuse permet de déceler de nombreux indices de désordres, ce qui est le but d'une inspection. Les marteaux de géologue sont recommandés car la tête et le manche ne font qu'un (continuité structurelle) et ils comportent une pique. De plus, leur masse, au moins 750 g, est suffisante pour mettre en vibration des revêtements amincis (épaisseur inférieure ou égale à 10 cm). Des marteaux plus légers, de 300 g, peuvent être utilisés pour des revêtements très minces (jusqu'à une épaisseur de 5 cm) mais ils sont moins performants pour des sous-épaisseurs moins marquées.

L'inspecteur a tout intérêt à utiliser toujours le même outil ; il « étalonnera » son oreille aux différentes réponses sonores des objets et son diagnostic en sera affiné.

Il existe maintenant des marteaux enregistreurs qui mesurent la vitesse des vibrations de la partie de structure soumise au martelage pour détecter la présence de vides ou de fracturations en profondeur.



Figure 19 : types de marteaux conseillés

Le fissuromètre

Cet outil permet d'évaluer l'ouverture des fissures observées lors de l'inspection et de suivre ainsi l'évolution de l'ouvrage dans le temps. Il existe différents types d'outils et d'appareils dont la mise en œuvre est plus ou moins lourde dont certains seront préférentiellement utilisés pour des mesures sur des périodes longues.

Lors de l'inspection, on privilégiera des outils légers, maniables et d'utilisation rapide tels que des fissuromètres en plastique.

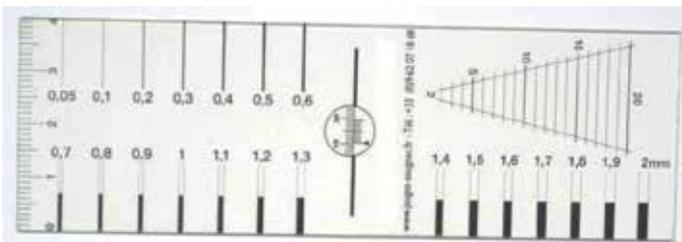


Figure 20 : exemple de fissuromètre

L'appareil photo

De préférence de type reflex, équipé d'un flash puissant, il est l'outil indispensable pour illustrer les désordres apparents qui seront signalés dans le rapport d'inspection. Il doit être muni d'un objectif grand angle de focale 18 voire 14 mm (soit un équivalent de 28 ou 24 mm en format 24x36) afin de pouvoir saisir une assez grande zone quand il y a peu de recul. L'appareil doit également permettre les prises des vues rapprochées (mode macro) pour les détails comme l'ouverture d'une fissure par exemple.

Le flash doit avoir un nombre guide d'au-moins 30 car de nombreux parements sales ou encroûtés réfléchissent peu la lumière. L'intérêt du flash déporté est de conserver le contraste visible à l'œil nu (fissures humides ou désaffleurements...) et qui s'atténue sous un éclair trop puissant.

Le ruban de mesure

C'est un outil qui permet de se repérer dans un tunnel ne comportant encore aucun marquage (à éviter absolument) ou de mesurer certaines dimensions de parties d'ouvrage. Pour le marquage, afin de limiter les erreurs cumulées faites lors du déplacement du ruban, une longueur de 50 m est recommandée.

Les équipements de protection individuels (EPI)

Ils sont obligatoires pour toute intervention sur le réseau routier, en particulier :

- des chaussures de sécurité,
- des gants,
- un baudrier réfléchissant de couleur jaune (cette couleur est la plus visible dans un milieu éclairé artificiellement),
- un casque de sécurité muni d'une jugulaire.

Ces équipements sont à définir et à compléter avec le service opérationnel en fonction de l'environnement de la zone de travail et des conditions d'intervention (fermeture de l'ouvrage à la circulation, voies neutralisées, alternats, ...).

Les autres outils

D'autres outils, d'emploi simple, peuvent être utilisés pendant l'inspection : double mètre de poche, bacs jaugeurs, thermomètres, conductivimètres pour les venues d'eau, fissuromètres, pieds à coulisse pour les mesures des fissuromètres manuels, détecteurs d'armatures dans les bétons, ... La liste n'est pas limitative et dépend du contexte. Tous ces outils doivent rester légers, maniables et d'emploi rapide.

7.2.2 La méthode d'inspection

Déroulement de l'inspection

L'inspection d'une voûte se fait obligatoirement en plusieurs passages : un passage à pied pour chaque piédroit et au minimum un passage en nacelle pour la calotte mais souvent plus en fonction de sa largeur.

Il est préférable de débiter l'inspection d'une voûte depuis le sol. Les plaques de marquages fixées en piédroit permettent un repérage rapide et précis des détails de structures que l'on décide de noter sur le levé d'intrados. Il est parfois plus facile de repérer précisément depuis le sol un désordre situé en calotte. Le travail en nacelle permet ensuite d'ausculter la voûte, de caractériser ou préciser les désordres déjà repérés depuis le bas, mais aussi d'en découvrir d'autres.

Les parements rapportés (ou habillages) et les éléments de protection passive sont inspectés de façon sommaire. Il est important de vérifier, dans la mesure du possible, leur système de fixation. L'inspecteur doit cependant avoir à l'esprit qu'un désordre présent sur le parement ou la protection passive ne présage en rien l'état de la structure sous-jacente. En cas de doute, il peut demander au gestionnaire le retrait des éléments incriminés pour avoir accès à la structure. La dépose et la repose des éléments rapportés sont de la responsabilité du maître d'ouvrage gestionnaire.

Dans le cas d'un tunnel en exploitation, et si des itinéraires de déviation existent, il est recommandé de procéder à la fermeture totale du tube (cas de figure idéal pour une inspection). Lorsque ce n'est vraiment pas possible, le travail s'effectue sous circulation, sur une voie neutralisée et balisée. La demi-voûte est donc inspectée en totalité (sol et nacelle) avant de procéder de la même façon sur l'autre voie.

Pour les plus grands tunnels comportant des structures secondaires (gainnes de ventilation, galeries d'évacuation, gainnes techniques...), l'équipe d'inspection peut se scinder et travailler parallèlement sur chaque partie d'ouvrage pour optimiser le temps d'intervention. Il en est de même pour les parties observées à pied ou en nacelle élévatrice. Il faut toutefois réserver des temps supplémentaires pour la communication entre équipes (débriefting) ou pour compléter l'examen de zones le justifiant.

L'examen des chaussées et trottoirs, des dispositifs d'assainissement ou de drainage (pour les parties accessibles) ne doit pas être oublié tout comme les ouvrages de têtes et leurs abords immédiats. Pour ces derniers, l'examen ne peut se faire qu'avec une nacelle à déport latéral, de préférence de jour.

Visite des parties d'ouvrage difficiles d'accès

Certaines parties d'ouvrages sont d'accès ou de parcours difficiles (gainnes surbaissées, puits, espaces annulaires entre voûtes, parements décalés). Si la surveillance continue y soupçonne des désordres, le gestionnaire doit mettre à la disposition des inspecteurs les moyens nécessaires à un examen de qualité.

Dans les cas où la surveillance continue et les contrôles annuels (dont un modèle de constat est donné en **annexe 10**) ne mettent pas en évidence de dysfonctionnement, ces parties peuvent être examinées lors d'une inspection sur deux.

L'examen des espaces non visitables fait appel à des techniques spéciales (par exemple, une vidéo-endoscopie de réseaux de drainage ou d'assainissement pour évaluer leur engorgement ou leur rupture). Ces opérations relativement lourdes peuvent être proposées par l'inspecteur, à la vue des désordres relevés, mais sont laissées à l'initiative du gestionnaire.

Le relevé des observations

Sur le terrain, l'inspection d'un tunnel consiste à relever les défauts et désordres des parties et sous-parties qui le constituent.

Chaque désordre relevé est coté et repéré par deux points métriques (PM) indiquant son début et sa fin. Un désordre ponctuel peut être repéré sur le levé par son PM.

Quelles que soient les informations déjà acquises par l'étude des documents, l'inspecteur se doit d'examiner tout ce qui apparaît à l'intrados, en chaussée, aux têtes et en extérieur. Il concentre néanmoins son attention sur les points signalés par les agents des services organisationnels et opérationnels ; il tente de les confirmer (ou les infirmer) par ses propres observations.

Il doit dessiner, sur le levé développé, les détails de structure et les désordres constatés et noter tout indice lui permettant d'appréhender la situation et d'ébaucher un pré-diagnostic. Il y a donc un tri à faire, parfois difficile, devant la quantité « d'objets » visibles. On conçoit que son relevé soit une sélection (donc déjà une interprétation) destinée à mettre en évidence des zones sensibles, puis à identifier une pathologie.

Il est donc très important que les inspecteurs aient une bonne expérience des désordres (symptômes, causes, suites possibles), ainsi qu'une bonne connaissance du comportement des structures, afin de pouvoir détecter à temps un désordre important sur la base d'indices parfois discrets.

La connaissance des méthodes de construction employées pour les tunnels permettra un diagnostic affiné. En effet, les méthodes de constructions des tunnels en maçonnerie peuvent avoir des influences différentes sur le comportement de la structure. A l'inverse, une épaufrure systématique du béton, liée aux opérations de décoffrage, est un défaut qu'il faut relever mais qui ne sera pas considéré comme un désordre, s'il n'y a pas d'évolution.

Pour les sections ou tunnels non revêtus, l'inspection s'apparente à un levé géologique (nature des différents terrains, fracturation), au cours duquel on doit rechercher en priorité les zones d'instabilités rocheuses constituant un danger pour les usagers. Le recours à une personne compétente en géologie est indispensable.

De nombreuses photographies, d'ensemble et de détail, viennent compléter les relevés. Il faut toutefois, pour une meilleure exploitation au bureau et un rendu efficace, pouvoir repérer facilement les prises de vues. En général, une photographie en grand angle permet de localiser un désordre dans le tunnel ; une vue rapprochée permet de rendre compte de son importance à condition de faire apparaître un repère d'échelle dans le champ.

Les relevés peuvent être aussi complétés par de l'imagerie scanner, des mesures thermographiques, des relevés profilométriques ou encore d'autres méthodes d'auscultation avec rendu graphique (ces méthodes sont développées en annexe 7). Les documents ainsi obtenus constituent une aide très précieuse pour la visualisation objective d'un intrados mais ils ne remplacent pas l'examen visuel « au contact ».

Dans tous les cas, une description précise est le point de départ indispensable d'un bon diagnostic.

En fin d'intervention, le responsable d'inspection fait un bilan des observations et peut émettre un premier avis auprès du gestionnaire local de l'ouvrage (niveau opérationnel). Le cas échéant, il signale de manière formelle aux niveaux organisationnel et décisionnel tout désordre engageant la sécurité des usagers ou la stabilité de l'ouvrage. Si nécessaire, il propose des mesures conservatoires ou d'exploitation à prendre.

7.2.3 Le travail de bureau

Ce travail est de la responsabilité de l'inspecteur et consiste en la mise sur plans des désordres relevés sur le terrain, à l'aide d'outils de saisie DAO, et la rédaction du rapport d'inspection.

Levé d'intrados

Il s'agit essentiellement du levé sur lequel l'inspecteur note et dessine tous les désordres constatés.

Le levé d'intrados initial est établi au cours de la première inspection détaillée. Il doit ensuite être tenu à jour avec le plus grand soin, grâce au report des constatations faites à l'occasion des différentes inspections ou visites, et à l'indication des travaux effectués précisément repérés. Ces mises à jour doivent pouvoir être faites par des inspecteurs autres que ceux qui ont effectué le levé initial, mais sur des bases graphiques absolument identiques. L'archivage des plans et des documents qui ont servi à les établir est aussi une part importante du travail de l'inspecteur.

Le levé doit pouvoir être interprété sans ambiguïté par toute personne appelée à le consulter en vue d'une intervention, quelle qu'en soit la nature. Il doit faire apparaître de façon claire les zones d'ouvrage dans lesquelles peut être engagée la sécurité des usagers ou la bonne tenue des structures.

Enfin, la définition et l'application d'une politique cohérente pour la surveillance et l'entretien d'un ensemble de tunnels seront facilitées par l'emploi de levés entièrement comparables.

Des éléments (figurés et symboles) sur la codification des matériaux, des équipements et des désordres sont présentés en **annexe 11**. Ils facilitent la lecture des levés et sont à employer de préférence à toutes autres représentations.

Rapport d'inspection

Le but de ce rapport est de rendre compte au gestionnaire, avec le plus de précision possible, de l'état de l'ouvrage à la date de l'inspection.

Si des désordres sont constatés, il présente le pré-diagnostic en faisant apparaître clairement les différents tronçons et zones identifiés dans l'ouvrage. Dans les cas simples, le rapport d'inspection peut aboutir directement au diagnostic et émettre, si nécessaire, des suggestions sur les types de réparations envisageables. Cependant, l'établissement du projet de réparation est une démarche séparée qui fait l'objet d'une étude distincte.

Dans les cas plus complexes où des incertitudes demeurent, le rapport propose des mesures ou des investigations complémentaires à réaliser. Les reconnaissances, à définir avec le maître d'ouvrage, permettront de progresser vers le diagnostic final.

Lorsque c'est le cas, le rapport rappelle les mesures conservatoires ou de sécurité qui ont été proposées à la fin de l'inspection.

Un cadre type pour la rédaction d'un rapport d'inspection est donné en **annexe 12**.



L'ÉVALUATION IQOA

Le principe général d'évaluation et de cotation par la méthode IQOA-Tunnels est l'outil défini par l'État pour la gestion et l'entretien de son patrimoine de tunnels creusés présents sur le réseau routier national.

Ce principe peut bien sûr être appliqué aux tunnels gérés par d'autres collectivités ou sociétés gestionnaires de tunnels mais il existe aussi des outils similaires disponibles sur le marché.

La méthodologie IQOA – Tunnels permet une approche adaptée au contexte des tunnels creusés par la prise en compte de la différence structurelle de l'ouvrage et de son terrain encaissant ; cette démarche reste toutefois homogène en terme de classe d'état avec la méthodologie IQOA – Tranchées couvertes.

Le présent chapitre décrit cette procédure d'évaluation et de cotation. Des exemples de cotations d'un tube et d'un tunnel à deux tubes sont donnés à l'annexe 13 de ce guide.

8.1 PRINCIPE D'ÉVALUATION

L'évaluation d'un tunnel est réalisée à partir d'inspections détaillées et, le cas échéant, d'investigations complémentaires. La cotation IQOA des tunnels proposée par les inspecteurs à l'occasion des inspections détaillées se compose :

- d'une cotation « Génie civil »,
- d'une cotation « Eau ».

Le Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements » d'octobre 2012, conformément à l'ITSEOA, oblige à une actualisation de ces cotations, tous les trois ans, par les services gestionnaires. Les notes sont modifiées dans l'hypothèse où des éléments nouveaux le justifient.

Le principe général d'évaluation et de cotation d'un tunnel par la méthode IQOA est basé sur :

- un découpage de l'ouvrage en tubes et en tronçons,
- une décomposition des tronçons en parties et sous-parties,

- une évaluation des éléments constitutifs des parties ou des sous-parties,
- une cotation suivant les classes d'état,
- un zonage de l'ouvrage, le découpant en zones de cotation identique.

Les ouvrages connexes, tels qu'ils sont définis au chapitre 3, ne relèvent pas tous de la méthode IQOA-Tunnels. Ils sont cependant inspectés en même temps que le tunnel avec l'appui éventuel de spécialistes compétents. Certains, comme les murs de soutènement, peuvent faire l'objet d'une évaluation selon la méthode IQOA-Murs.

Les ouvrages de conception et de technique de réalisation identiques à celles des tunnels creusés (galeries de sécurité et d'évacuation, locaux techniques, cheminées de ventilation, ... creusés dans le terrain) sont évalués suivant la méthode IQOA – Tunnels.

8.2 DÉCOUPAGE

Le principe général d'évaluation et de cotation des tunnels par la méthode IQOA est basé sur une partition de l'ouvrage. Cette partition consiste à découper l'ouvrage en tubes, les tubes en tronçons puis à définir les différentes parties d'ouvrage par tronçon.

8.2.1 Tubes

Un tunnel est composé d'un ou plusieurs tubes contenant une ou plusieurs voies de circulation. Un tube comporte deux extrémités appelées têtes.

8.2.2 Tronçons

Un tronçon est une section homogène de tube en terme de types de structures et de contextes géologiques. Il est défini par deux points métriques (PM) localisant son début et sa fin.

Le tunnel peut aussi comporter une galerie de sécurité, des galeries d'évacuation et des galeries inter-tubes qui sont découpées en tronçons sur les mêmes critères que ceux retenus pour les tubes.

Les ouvrages connexes influent sur le découpage des tubes mais n'y sont pas intégrés. Chacun de ces ouvrages peut disposer d'un découpage adapté à sa nature.

Définis à la construction, les tronçons ne varient pas dans le temps sauf cas exceptionnel comme, par exemple, une réparation lourde. Ce découpage constitue la base de travail pour tous les actes de surveillance.

8.2.3 Zones

Une zone est une section de tube définie par deux points métriques (PM) localisant son début et sa fin. Elle caractérise une section homogène au regard de la cotation IQOA. Définies lors de l'inspection détaillée initiale, ou lors de la première inspection appliquant l'évaluation IQOA, par le maître d'ouvrage (constructeur dans le cas d'une IDI, gestionnaire dans les autres cas), les zones peuvent varier dans le temps, en fonction de l'évolution des désordres et des observations issues de la surveillance. La modification des zones s'effectue généralement après une inspection détaillée périodique (IDP) mais peut être réalisée entre deux inspections consécutives.

Le zonage, reflétant l'analyse postérieure à l'inspection, est établi par l'inspecteur et proposé au maître d'ouvrage pour validation.

Les zones et les tronçons sont deux subdivisions longitudinales du tube, on peut passer de l'une à l'autre par le biais des points métriques.

Par convention, la longueur minimale d'une zone de cotation est égale à un mètre. Dans le cas d'un désordre ponctuel, elle est centrée sur celui-ci.

8.2.4 Parties et sous-parties pour le génie civil

Un tronçon est décomposé, pour les besoins de l'inspection, en parties et sous-parties. Pour le génie civil, trois parties peuvent être distinguées :

- partie « Zone d'influence » caractérisant l'environnement du tube,
- partie « Structure »,
- partie « Équipements de génie civil ».

La partie « Zone d'influence »

La zone d'influence caractérise l'environnement physique du tube. Toute modification dans cet espace peut avoir un effet direct sur l'ouvrage. La partie « Zone d'influence » recense les

éléments, aux abords de la structure, qui influent ou peuvent influencer sur son comportement. Pour les tunnels, il peut s'agir :

- du terrain encaissant (présence de failles, karsts, sols gonflants, falaises instables en têtes d'ouvrage, ...),
- de la végétation présente au niveau des têtes,
- des aménagements existants ou mis en place dans l'environnement immédiat du tunnel et qui peuvent modifier le comportement du massif et se répercuter sur l'ouvrage (carrières, voies nouvelles, ...).

Ces éléments peuvent être notés séparément ou dans leur globalité (dans ce second cas, la « Zone d'influence » n'est pas décomposée en sous-parties). Ils font l'objet de commentaires, suite à l'inspection des autres parties du tunnel, en particulier des têtes.

La partie « Structure »

La partie « Structure » rassemble tous les éléments résistants d'un tube (qui reçoivent les charges et les transmettent au terrain encaissant) et comprend différentes sous-parties dont une liste indicative est donnée ci-après :

- calotte,
- piédroits (gauche et droit, nord et sud, est et ouest...),
- radier.

La partie « Équipements de génie civil »

La partie « Équipements de génie civil » recense tous les éléments de génie civil de second œuvre, inclus dans la structure et destinés à :

- assurer l'exploitation de l'ouvrage,
- assurer la sécurité et le confort des usagers,
- protéger le tube des agressions extérieures,
- améliorer l'esthétique de l'ouvrage.

Les équipements de génie civil sont, le plus souvent, indissociables de la structure, ce qui les distingue des équipements d'exploitation et de sécurité comme l'éclairage ou la ventilation.

La partie « Équipements de génie civil » se décompose en autant de sous-parties que d'équipements existant dans le tube. Une liste non exhaustive est présentée ci-après :

- éléments architecturaux (corniches, parements architecturaux, ...),
- poutres de limitation de gabarit,
- murs anti-recyclage des fumées,
- dispositifs de retenue,
- trottoirs,
- gaines de ventilation (si elles ne sont pas intégrées dans les éléments structurels),
- drains, canalisations et regards,
- corps de chaussée.

En fonction du type d'ouvrage, certaines sous-parties « Structure » et « Équipements de génie civil » peuvent ne pas exister. Par exemple, les gaines de ventilation ne sont pas présentes dans tous les tunnels.

8.2.5 Parties et sous-parties pour l'eau

Le principe d'une partition « eau » permet d'évaluer distinctement l'état de la structure de génie civil et le paramètre important qu'est la présence de l'eau.

La partie « Eau » permet d'indiquer la présence d'eau et d'attirer l'attention du maître d'ouvrage gestionnaire, l'eau pouvant constituer une gêne ou un danger pour les usagers. Par contre, les conséquences qu'elle peut engendrer sur la structure par l'apparition ou l'aggravation de désordres sont prises en compte dans l'évaluation du génie civil.

Pour les besoins de l'inspection, la partie « Eau » est décomposée en différentes sous-parties qui sont :

- la calotte,
- les piédroits (gauche et droit, nord et sud, est et ouest...),
- la chaussée.

8.3 PRINCIPES DE COTATION

8.3.1 Classes d'état d'une zone

Classes d'état « Génie civil »

L'état d'une zone de tunnel est caractérisé par 5 classes dont la définition prend en compte la nature et la gravité des désordres qui affectent la structure.

La mention NE (non évaluée) peut être utilisée lors de la notation d'une partie ou sous-partie qui n'est pas visible ou pas visitable par les moyens classiques d'inspection. Cette mention doit rester exceptionnelle ; elle doit être justifiée dans le rapport d'inspection ou dans l'actualisation des cotations.

Les classes sont présentées ci-après.

Classe 1

Zone en bon état apparent.

Les zones de classe 1 ne nécessitent qu'un entretien courant et un entretien spécialisé préventif programmé.

Classe 2

Zone présentant des désordres mineurs (dans la zone d'influence, sur la structure ou sur les équipements de génie civil) qui ne mettent pas en cause la stabilité de la structure ou qui ne traduisent pas une instabilité du massif.

Les zones de classe 2, outre les entretiens prescrits pour les zones de classe 1, peuvent nécessiter un entretien spécialisé curatif sans caractère d'urgence.

Classe 2E

Zone présentant des désordres (sur la structure ou dans la zone d'influence) de classe 2 pouvant évoluer jusqu'à devenir importants et mettre en cause la stabilité de l'ouvrage.

ou

Zone présentant des équipements de génie civil gravement altérés ou dont la stabilité risque d'être compromise.

Les zones de classe 2E, outre les entretiens prescrits pour les zones de classe 1, nécessitent une surveillance particulière et un entretien spécialisé curatif urgent pour prévenir le développement rapide de désordres plus importants dans la structure ou pour remettre en état les équipements de génie civil endommagés.

L'indice « E » traduit le caractère évolutif de l'état de la zone.

Classe 3

Zone dont les désordres observés indiquent que la structure est altérée ou que la stabilité de la zone concernée est susceptible d'être compromise.

Les zones de classe 3 nécessitent des travaux de protection, réparation ou renforcement sans caractère d'urgence. Le diagnostic est à faire rapidement.

Classe 3U

Zone dont les désordres observés indiquent que la dégradation est profonde et que la stabilité d'ensemble de la zone est compromise à court ou moyen terme.

Les zones de classe 3U nécessitent une réparation d'urgence pour assurer la pérennité de l'ouvrage ou enrayer une évolution rapide des désordres qui le menacent. Les travaux doivent généralement être précédés de reconnaissances et d'auscultations pour leur bonne adaptation aux conditions géotechniques locales, ces dernières étant souvent mal connues.

L'indice « U » traduit l'urgence des actions à entreprendre.

Mention "S "

Cette mention complémentaire "S" est attribuée à l'une des 5 classes précédentes lorsque certains défauts ou déficiences constatés dans la zone, quelle que soit la partie concernée, peuvent mettre en cause la sécurité des usagers et nécessitent, de ce point de vue, d'être traitées de manière urgente.

La mention complémentaire "S" doit refléter l'existence d'un défaut d'une partie d'ouvrage influant sur la sécurité des usagers et non pas une non-conformité à des règles de sécurité ou un niveau de sécurité jugé insuffisant.

Classes d'état « Eau »

Nota : les classes « Eau » définies par le présent guide sont sensiblement différentes de celles données dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » édité par le CETU en 2004.

L'état d'une zone de tunnel peut être caractérisé par 3 classes dont la définition prend en compte l'importance de la présence de l'eau et la forme sous laquelle elle se manifeste. On ne considère plus dans cette cotation l'influence de l'eau sur l'état de la structure (évaluée dans la classe « Génie Civil »).

La mention NE (non évaluée) peut être utilisée dans les zones où l'on ignore s'il y a une présence d'eau (absente, invisible ou non décelable par des moyens d'inspection classiques)

comme, par exemple, les venues d'eau derrière des parements rapportés. Cette mention doit rester exceptionnelle ; elle doit être justifiée dans le rapport d'inspection ou dans l'actualisation des cotations.

La cotation « Eau » proposée par l'inspecteur reflète la présence de l'eau le jour de la visite sur site. Le gestionnaire est invité à modifier cette cotation en s'appuyant sur sa connaissance de l'ouvrage et la surveillance continue pour prendre en compte l'état le plus défavorable au cours de l'année. La cotation « Eau » est le résultat d'observations et ne requiert pas de connaissance particulière en ouvrages d'art.

Les classes sont présentées ci-après.

Classe 1

Zone ne présentant pas d'écoulement d'eau visible ;

ou

Zone pour laquelle on relève seulement des coulures sèches ou des taches humides sur les parements ou les trottoirs.

Les zones de classe 1 ne nécessitent que l'entretien courant et l'entretien spécialisé préventif des réseaux de drainage et d'assainissement.

Classe 2

Zone avec écoulement d'eau de faible intensité :

- goutte-à-goutte (quel qu'en soit le débit),
- flaque localisée d'une épaisseur inférieure ou égale à cinq millimètres,
- tache humide sur la chaussée,
- écoulement continu formant un film d'eau, ruisselant sur le revêtement, d'une épaisseur inférieure au millimètre.

Les zones de classe 2 doivent faire l'objet, au-delà des interventions prescrites pour les zones de classe 1, d'une surveillance régulière par le service gestionnaire.

Classe 3

Zone avec écoulement d'eau de forte intensité :

- écoulement continu formant un film d'eau, ruisselant sur le revêtement, d'une épaisseur supérieure au millimètre, arrivée d'eau sous pression,
- écoulement continu tombant sur la chaussée (quel qu'en soit le débit),
- flaque dont la surface est supérieure à dix mètres carrés ou dont l'épaisseur est supérieure à cinq millimètres.

La classe 3 est utilisée lorsque l'intensité du débit d'une arrivée d'eau ponctuelle ou les volumes d'eau provenant de surfaces diffuses sont importants. Cela justifie que des travaux spécifiques soient entrepris, relayant les dispositions de sécurité à prendre par le service gestionnaire.

Mention "S "

Cette mention complémentaire "S" est attribuée à l'une des 3 classes précédentes lorsque la présence d'eau dans la zone peut mettre en cause la sécurité des usagers et nécessite, de ce point de vue, d'être traitée de manière urgente.

En particulier, la mention "S" est utilisée lorsque la présence d'eau :

- sous les effets du gel, peut conduire à la formation de stalactites de glace, verglas ou amas de glace sur la chaussée ou gênant l'utilisation des dispositifs de sécurité ;
- à cause de la nature des minéraux qu'elle transporte, peut provoquer une perte d'adhérence des véhicules (par exemple, calcite colmatant les rugosités de la couche de roulement) ;
- liée à l'absence ou au colmatage des exutoires, peut générer un danger pour la circulation routière (par exemple, inondation de la chaussée).

8.3.2 Tableau récapitulatif des notes IQOA

Pour avoir une vision d'ensemble de l'état d'un tunnel, les notes IQOA des différentes parties ou sous-parties sont récapitulées sous forme d'un tableau. Ce tableau peut être établi sur la base du tableau de tronçonnage de l'ouvrage même si on rappelle que le tronçonnage et le zonage sont indépendants.

Le tableau peut aussi être établi de façon automatisée à l'aide d'un logiciel informatique à partir des notes affectées pour différentes parties d'ouvrage et des PM associés à ces notes.

8.3.3 Cotation « Génie civil »

Cotation « Zone d'influence »

La cotation de cette partie est réalisée à partir des désordres (fissures, déformation, effondrement local, ...) relevés dans la zone d'influence telle que définie précédemment. Il peut s'agir de désordres constatés sur les éléments comme les sols, la chaussée, les équipements de la route (candélabres, poteaux de signalisation, ...) ou même la végétation. Ils peuvent être des signes d'instabilité des fronts de taille ou des versants adjacents (chute de blocs rocheux sur la voie, glissement de terrain, ...).

Les principaux désordres concernant la zone d'influence, leurs origines possibles et les plages de classe d'état associées sont donnés à l'**annexe 14**. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive. Pour tous ces désordres, la classe d'état peut recevoir la mention S.

Cotation « Structures »

La cotation de la partie « Structures » est obtenue à partir d'une synthèse des cotations de ses différentes sous-parties définies en 8.2.4. La cotation d'une sous-partie est faite à partir des désordres apparents relevés sur ses différents éléments à l'aide du « Catalogue des désordres » - livre 2 du présent guide.

La cotation d'une sous-partie « Structures » s'inscrit dans l'une des cinq classes d'état de 1 à 3U et peut recevoir la mention "S".

Cotation « Équipements de génie civil »

Seuls les équipements de génie civil sont évalués et cotés suivant la méthode IQOA ; les équipements d'exploitation et de sécurité (réseau d'incendie, accélérateurs de ventilation, etc.) ne rentrent pas dans le champ d'application d'IQOA-Tunnels. Leur surveillance et leur évaluation sont définies dans le Fascicule 40 et ses annexes disponibles sur le site Internet du CETU (www.cetu.developpement-durable.gouv.fr).

La cotation de la partie « Équipements de génie civil » est obtenue à partir d'une synthèse des cotations de ses différentes sous-parties définies en 8.2.4. La cotation d'une sous-partie est faite directement à partir des désordres relevés.

Les principaux désordres concernant les équipements de génie civil, leurs origines possibles et les plages de classe d'état associées sont donnés à l'**annexe 15**. Contrairement aux parties « Structures » et « Zone d'influence », la cotation d'une sous-partie « Équipements de génie civil » s'inscrit uniquement dans l'une des trois premières classes d'état (1, 2 ou 2E) mais peut recevoir la mention S.

Les équipements de génie civil comprenant souvent des éléments de faibles dimensions en comparaison à la longueur d'un tunnel, la zone de cotation d'un tel élément est prise égale à un mètre et repérée par son seul PM (regard, poutre de limitation de gabarit, ...).

8.3.4 Cotation « Eau »

La cotation « Eau » est obtenue à partir d'une synthèse des cotations de ses différentes sous-parties : la calotte (ou la dalle de ventilation), les piédroits, la chaussée. La cotation de chaque sous-partie est directement liée à l'importance de la présence d'eau et la forme sous laquelle elle se manifeste.

Cette cotation comporte trois classes d'état (1, 2 et 3) et peut recevoir une mention S.

8.3.5 Première agrégation des notes IQOA par partie constitutive

Cette première agrégation permet d'avoir une vue d'ensemble des classes d'état attribuées à chaque partie et sous-partie constitutive sur la base du tronçonnage retenu pour l'ouvrage.

En principe, la classe d'état la plus défavorable attribuée à l'une de ses sous-parties est retenue comme la classe d'état de la partie au PM considéré.

Cette agrégation des notes IQOA fait apparaître, en plus des classes d'état, la mention « SO » (sans objet) qui indique que l'élément n'entre pas dans la décomposition du tronçon, ainsi que la mention « NE » (non évalué).

Il est rappelé que la mention « NE » traduit le fait que la partie ou la sous-partie en question n'a pas été évaluée entre deux PM. Une telle mention doit rester exceptionnelle et être justifiée dans le rapport d'inspection ou dans les conclusions d'une actualisation des cotations.

Pour l'agrégation des cotations, la mentions « SO » et les

classes d'état IQOA sont hiérarchisées de la manière suivante :

- pour le génie civil : $SO < 1 < 2 < 2E < 3 < 3U$
- pour l'eau : **SO < 1 < 2 < 3.**

La mention « NE » ne présage en rien de l'état de la partie ou sous-partie non évaluée.

8.3.6 Seconde agrégation et synthèse des cotations

Cette seconde agrégation est une présentation statistique des seules cotations « génie civil » et « eau » obtenues par la première agrégation rapportées au linéaire total du tube et, le cas échéant, au linéaire de l'ensemble du tunnel.

Le principe est de cumuler les linéaires de tubes ou de tunnel affectés de chaque note IQOA identiques (de 1 à 3U pour le génie civil, de 1 à 3 pour l'Eau). Un tableau présente ensuite la proportion en pourcentage de chaque note attribuée sur la totalité de chaque tube et du tunnel.

Les tableaux, présentés à l'**annexe 13**, illustrent les deux agrégations et la synthèse des notes IQOA dans les cas d'un tube et d'un tunnel comportant deux tubes.

Cette synthèse est aussi utile au CETU qui établit pour le compte de l'administration centrale un bilan annuel des évaluations IQOA effectuées sur le réseau national non concédé.



9.1 INSTRUCTIONS

- [1] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) – Dispositions générales applicables à tous les ouvrages (fascicule 0)* – Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), décembre 2010
- [2] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) – Dossier d'ouvrage (fascicule 1)* – Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), 2000 [en cours de refonte]
- [3] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) – Généralités sur la surveillance (fascicule 2)* – Sétra, décembre 2010
- [4] *Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) – Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde (fascicule 3)* – Sétra, décembre 2010

9.2 GUIDES ET RECOMMANDATIONS

- [5] *Fascicule 40 : Tunnels – Génie civil et équipements* – Centre d'études des tunnels (CETU), octobre 2012
- [6] *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers – Du désordre vers le diagnostic* – Les guides du CETU, CETU, 2004
- [7] *Retours d'expérience sur la réparation du génie civil des tunnels routiers creusés* – Les guides du CETU, CETU [en cours de rédaction]
- [8] *Catalogue des désordres en ouvrages souterrains – Recommandations de l'AFTES sur la réhabilitation des ouvrages souterrains (AFTES recommendations on rehabilitation for underground structures)* – Tunnels et ouvrages souterrains, hors-série n°3, association française des tunnels et de l'espace souterrains (AFTES), 2005
- [9] *Traitements d'arrêts d'eau dans les ouvrages souterrains* – Tunnels et ouvrages souterrains n°194/195, AFTES, mars-juin 2006
- [10] *Comportement au feu des tunnels routiers* – Les guides, CETU, 2005
- [11] *Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual* – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration and Federal Transit Administration, 2005
- [12] *Tunnels : inspection, assessment and maintenance* – Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 2009
- [13] *Évaluation des ouvrages – IQOA tranchées couvertes – guide méthodologique* – Sétra, mai 2011 (version provisoire)
- [14] *Évaluation des ouvrages – IQOA tranchées couvertes – guide d'inspection* – Sétra, mai 2011 (version provisoire)

9.3 SITES INTERNET

Centre d'études des tunnels (CETU) :

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) :

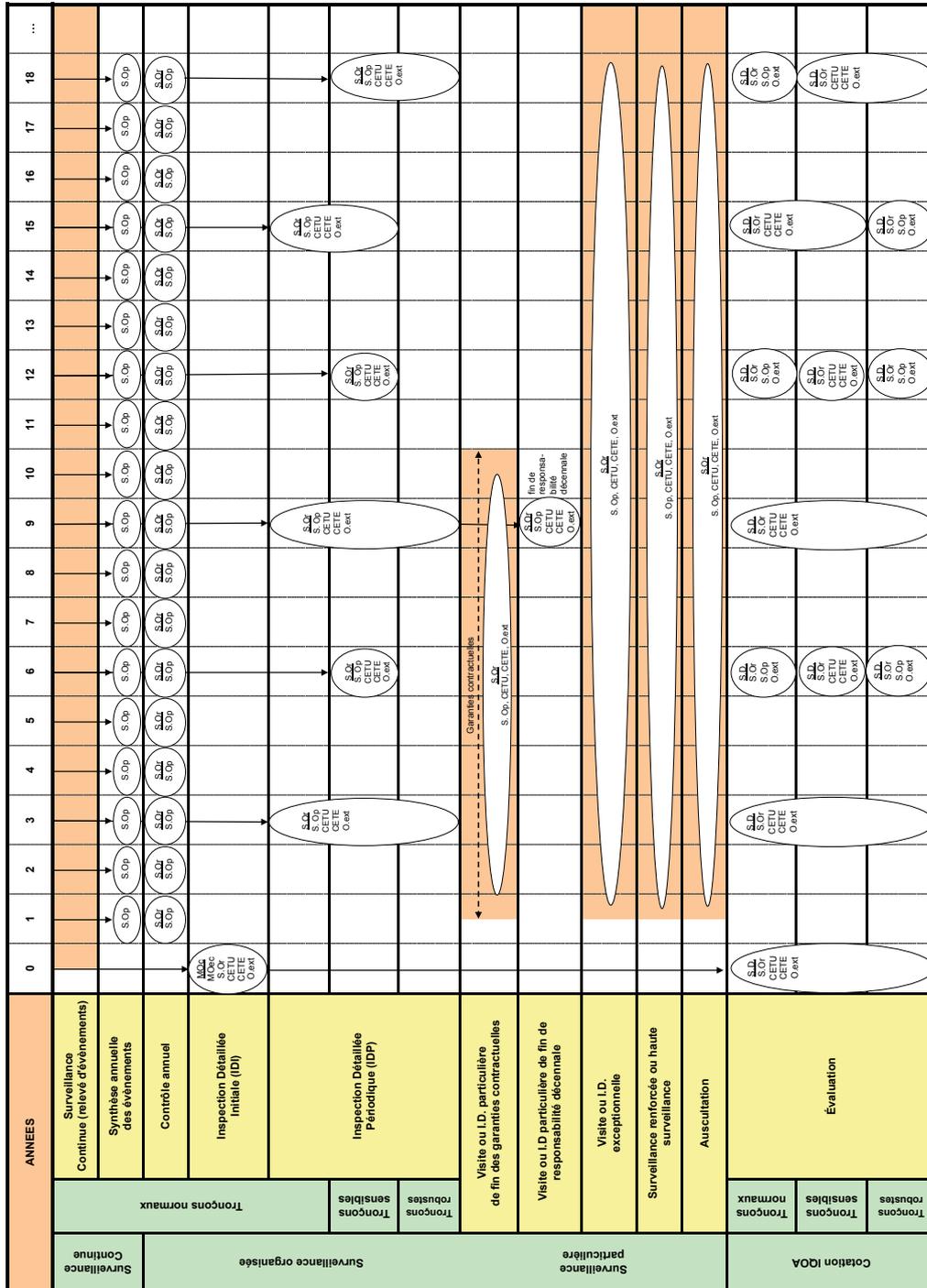
www.setra.developpement-durable.gouv.fr

Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) :

www.aftes.asso.fr

ANNEXE 1 : LOGIGRAMME D'ORGANISATION DE LA SURVEILLANCE DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS

Nota : cette annexe reprend l'annexe 2 du Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements » de 2011.



Signification des abréviations et des sigles

- S.D. Service décisionnel
- S.O. Service organisationnel
- S.Op. Service opérationnel
- O.ext. Organisme extérieur
- CETE Centre d'études techniques de l'équipement
- CETU Centre d'études des tunnels
- MOC maître d'ouvrage des travaux de construction ou de réparation
- MIEec maître d'œuvre des travaux de construction ou de réparation

Nota :
 Le CETU intervient pour les tunnels creusés.
 Le CETE intervient pour les tranchées couvertes.
 Les intervenants soulignés ont l'initiative de l'action.

ANNEXE 2 : MODALITÉS D'INTERVENTION – ÉLÉMENTS D'UN CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES TYPES POUR UNE INSPECTION DÉTAILLÉE (ID) DE TUNNEL

10.2.1 Travaux préliminaires à réaliser par le maître d'ouvrage gestionnaire

La liste des ouvrages devant faire l'objet d'une inspection détaillée (ID) est arrêtée en début d'année par le service décisionnel. Le service organisationnel, en liaison avec le service opérationnel, doit alors examiner pour chaque ouvrage les conditions d'intervention :

- signalisation et personnel nécessaires,
- nettoyage préalable des abords des têtes, des accès et des parements de l'ouvrage,
- information des autres gestionnaires (ouvrages ou voies riveraines).

Le service organisationnel établit la liste des documents disponibles et nécessaires à l'inspection et les met à disposition de l'équipe d'inspection. En liaison avec le service opérationnel, il vérifie l'existence du marquage décimétrique et s'assure de son bon état (voir **annexe 9**). Dans l'hypothèse contraire, il le fait réaliser lors d'une intervention préalable.

10.2.2 Équipe d'inspection

Pour le réseau routier national non concédé, le service organisationnel fait appel prioritairement, au CETU. Exceptionnellement, il peut demander l'intervention soit d'un autre organisme spécialisé du réseau scientifique et technique (RST) de l'État, soit d'un prestataire privé. Dans les deux cas, les organismes doivent pouvoir justifier de l'expérience et des compétences de leur personnel telles qu'elles sont définies au chapitre 2 de ce guide.

L'ensemble de l'inspection détaillée doit être dirigée par un agent qualifié du niveau ingénieur ayant obligatoirement reçu une formation spécialisée dans le domaine des tunnels. Il dirige la rédaction du rapport. Il a la responsabilité des analyses et des conclusions qu'il apporte.

Il est rappelé que l'équipe de constatations doit être dirigée par un agent de niveau technicien supérieur, ayant au moins 3 ans d'expérience d'inspection détaillée en tunnel, ou par un ingénieur ayant au moins un an d'expérience en inspection.

L'équipe d'inspection d'un tunnel doit comporter, en outre, un agent pouvant attester d'une formation en géologie lorsque l'ouvrage (ou une partie d'ouvrage) n'est pas revêtu.

L'ensemble de l'équipe doit avoir suivi une formation qualifiante dans le domaine de l'inspection du génie civil des tunnels.

Lorsqu'une inspection est confiée à un prestataire privé, il doit être demandé aux candidats, lors de la consultation, de fournir à l'appui de leurs offres :

- les curriculum vitae et attestations de formation des membres de l'équipe d'inspection qui seront réellement sur le terrain ainsi que du responsable de l'inspection,
- éventuellement des **exemples de rapports établis préalablement**.

Toujours dans ce cadre, la commande doit spécifier l'obligation pour le prestataire qui exécute l'inspection détaillée d'établir un plan de la qualité (PQ) qui permet au service organisationnel de s'assurer des moyens matériels dont dispose le prestataire, des modalités d'exécution de sa future mission et du contrôle intérieur qu'il a mis en place.

10.2.3 Préparation de l'intervention

Les services organisationnels et opérationnels doivent définir, d'un commun accord avec le responsable de l'inspection, les moyens d'accès nécessaires et le calendrier des interventions. Le service organisationnel peut alors faire, avec l'équipe d'inspection, une pré-visite de chaque ouvrage en fonction de sa complexité. Au cours de cette pré-visite, les points demandant une attention particulière et les mesures à réaliser sont listés en détail.

Une inspection n'est pas possible sans une interruption totale, de préférence, ou, a minima, partielle du trafic. Les périodes d'intervention doivent être établies en prenant en compte les contraintes d'exploitation de la route (périodes de fort trafic, viabilité hivernale, chantiers programmés, possibilités de déviation).

Lorsque l'équipe chargée de l'ID est désignée, elle doit :

- planifier l'intervention (demande des sujétions d'intervention aux services organisationnels et opérationnels...),
- récupérer le dossier d'ouvrage (y compris les résultats de la surveillance antérieure),
- analyser le dossier, plus particulièrement l'historique de l'ouvrage, et attester qu'elle en a bien pris connaissance,
- **préparer les fonds de plans des levés d'intrados.**

Le responsable de l'inspection, en lien avec le service opérationnel, doit produire un programme d'intervention. Le programme doit définir :

- les jours et les plages horaires d'interventions,
- les moyens humains nécessaires pour l'équipe d'inspection,
- les autres moyens humains nécessaires (forces de l'ordre, agents du service opérationnel...),
- les rôles respectifs de chacun,
- les accès utilisés,
- éventuellement, le balisage à mettre en place pour l'intervention,
- les éventuelles déviations de trafic à prévoir,
- la liste des matériels spécifiques (nacelle, chariot élévateur...).

10.2.4 Intervention in-situ

Elle comprend pour l'équipe d'intervention :

- la mise en place des moyens demandés par le service organisationnel (nacelle...) et tout le matériel nécessaire à la réalisation de l'inspection (voir chapitre 7),
- la vérification des conditions de sécurité de l'intervention définies par le plan général de coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (PGCSPS) ou la « Notice particulière » rédigée par le niveau organisationnel ou le niveau opérationnel (voir **annexe 3**),
- l'examen visuel rapproché « à portée de main » des parties accessibles avec les moyens définis lors de la pré-visite et le relevé exhaustif des désordres complété par quelques mesures simples (distances, longueurs et ouvertures des fissures, sondages au marteau, prélèvements...),
- l'inspection de la zone d'influence au-dessus des tunnels lorsque la couverture est faible pour vérifier, notamment, le bon entretien de la végétation, l'intégrité des dispositifs d'assainissement et d'étanchéité visibles, la conformité des charges avec celles prises en compte lors du dimensionnement de l'ouvrage...,
- la prise de clichés susceptibles d'aider à la compréhension des désordres et de les illustrer.

Le responsable des constatations sur le site doit prendre, en tant que de besoin, l'initiative de proposer au service organisationnel les investigations complémentaires qui lui paraissent indispensables à l'interprétation de ses constatations. Le rapport doit justifier, a posteriori, le bien-fondé de ces **investigations**.

10.2.5 Réunion-bilan

A la fin de la visite, une réunion-bilan peut avoir lieu, sur place, avec le service organisationnel ou opérationnel, au cours de

laquelle l'organisme en charge de l'ID présente les principaux désordres constatés. Cette réunion-bilan est souhaitable dans tous les cas ; elle s'avère indispensable dès lors qu'une zone est susceptible d'être cotée 3, 3U ou affectée de la mention S, c'est-à-dire lorsque des actions d'entretien ou de réparations doivent être lancées à l'issue de l'inspection.

10.2.6 Réalisation des levés des désordres

Le report systématique des désordres sur les levés d'intrados doit se faire suivant une codification telle qu'ils soient interprétables sans ambiguïté par toute personne appelée à les consulter, en vue d'une intervention ultérieure, quelle qu'en soit la nature.

La conception et la codification des relevés d'intrados pour les tunnels font l'objet de l'**annexe 11**. La méthode de représentation utilisée consiste à reporter les observations sur un plan développé de la voûte supposée vue de l'extérieur de l'ouvrage, afin d'obtenir une cartographie détaillée de l'intrados.

L'agent en charge de la réalisation des levés devra utiliser les nomenclatures et représentations données dans les différents catalogues de désordres et recommandations édités par le CETU, le SETRA ou l'AFTES (voir **annexe 11**).

10.2.7 Rédaction du rapport d'inspection détaillée

Un cadre-type de rapport est proposé en annexe 12. Le cas échéant, le service organisationnel peut adapter ce modèle à son ou ses ouvrages et le joindre au dossier de consultation des entreprises (DCE) s'il souhaite que le prestataire le respecte.

Dans le cas où l'ID d'un tunnel du réseau routier national non concédé a été réalisée par un bureau d'études privé, le rapport doit faire l'objet d'un contrôle extérieur par le RST. De même, la proposition de cotation IQOA-Tunnels doit être vérifiée par ce contrôle extérieur.

Comme pour les levés des désordres, l'agent en charge de la rédaction du rapport devra employer les nomenclatures données dans les guides et les dossiers pilotes édités par l'AFTES, le CETU ou le SETRA pour la description des parties d'ouvrage, leur appellation et la caractérisation des désordres.

10.2.8 Réunion de conclusion

La présentation du rapport d'inspection peut faire l'objet d'une réunion organisée avec le maître d'ouvrage gestionnaire. Au cours de cette réunion le responsable de l'inspection doit présenter les principaux résultats de l'inspection et les cotations

proposées à l'issue de celle-ci. Cette réunion est souhaitable dans tous les cas ; elle est indispensable dès lors qu'une zone est susceptible d'avoir une note 3 ou 3U, ou bien si sa note est affectée de la mention S.

10.2.9 Exemple d'application à un tunnel creusé et revêtu en béton

INSPECTION DETAILLEE DU TUNNEL

DE
XXX

Cahier des clauses techniques particulières (CCTP)

ARTICLE 1 – NATURE DES PRESTATIONS

1.1 – Objet du marché

Les travaux, définis au présent marché, ont pour objet l'inspection détaillée du tunnel de XXX, au sens de l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) de décembre 2010. Les modalités de l'inspection détaillée d'un tunnel sont fournies dans le guide technique « Tunnels – Génie civil et équipement (Fascicule 40) » et dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers », version 2013, édités par le Centre d'Études des Tunnels (CETU).

L'inspection concerne le génie civil et porte sur toutes les parties citées dans la description de l'ouvrage. Elle doit faire l'objet d'un examen rapproché visuel et sonore. Pour les réseaux d'assainissement et de drainage, elle porte sur toutes leurs parties accessibles par les niches ou les regards.

1.2 – Description de l'ouvrage

➤ *Faire une description détaillée de l'ouvrage à inspecter*

1.3 – Consistance des travaux

L'inspection détaillée se déroule en quatre phases principales :

- la préparation,
- l'inspection détaillée proprement dite,
- une réunion-bilan à l'issue de l'inspection sur site (avec un compte-rendu sommaire par télécopie ou messagerie électronique),
- l'établissement du rapport d'inspection et la proposition de cotation selon la méthode IQOA-Tunnels, ainsi qu'une réunion de conclusion au cours de laquelle sont présentées les conclusions de l'inspection et les cotations proposées.

1.3.1 Préparation

Cette phase comprend :

- la récupération auprès du maître d'ouvrage de tous les documents nécessaires à la préparation et à l'analyse finale de l'inspection détaillée,
- l'étude de ces documents,
- l'établissement des plans et fonds de levés, nécessaires au bon déroulement de l'inspection,
- la pré-visite de l'ouvrage permettant de définir les moyens nécessaires à l'inspection,
- l'établissement du plan qualité (PQ),
- l'établissement du plan particulier en matière de sécurité et de protection de la santé (PPSPS),
- la fourniture d'éléments permettant l'établissement du dossier exploitation sous chantier (DESC) et l'obtention des arrêtés de circulation,
- la mise au point du planning d'intervention avec le service opérationnel et le service organisationnel (maître d'œuvre).

➤ *La phase de préparation doit être validée par le niveau organisationnel avant toute intervention sur le terrain.*

1.3.2 Inspection détaillée

L'inspection est réalisée conformément à l'ITSEOA et aux guides cités dans l'objet du marché. Il s'agit d'une inspection visuelle et sonore de toutes les parties d'ouvrages et des zones d'influence aux abords :

➤ *Lister les éléments à inspecter*

Pour le tunnel de XXX, les désordres ou défauts susceptibles d'être constatés sont ceux de la liste figurant dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » du CETU, cette liste n'étant pas exhaustive.

Pour chaque type de désordre, les paramètres à relever, les autres désordres ou défauts associés à rechercher sont détaillés dans le livre 2 (Catalogue des désordres) du « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers ».

Le titulaire effectue les levés sur un support papier, comportant un fond de plan constitué de la développée du tunnel, à l'échelle 1/100^{ème}, ou par tout autre procédé (support informatique) donnant le même niveau de précision.

Les détails de structure de l'ouvrage, tels que les niches, puits, by-pass, ainsi que les équipements (accélérateurs, panneaux à message variable (PMV)...) sont à reporter sur les levés de façon à faciliter le repérage.

Dans le cas où l'équipe d'inspection identifie un problème important engageant, à court terme, la stabilité du tunnel ou la sécurité des usagers, elle doit en informer sans délai le service organisationnel (maître d'œuvre) et lui transmettre simultanément un procès-verbal.

1.3.3 Réunion-bilan

A la fin de la visite, a lieu sur place une réunion avec le service organisationnel (maître d'œuvre), au cours de laquelle le titulaire présente les désordres constatés et leur évolution par rapport à l'inspection détaillée précédente. Il donne aussi ses premiers commentaires sur les désordres et leur évolution.

1.3.4 Établissement du rapport d'inspection

Toutes les observations réalisées lors de l'inspection sont consignées dans un rapport établi suivant le modèle donné à l'annexe 12 du « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers ».

[Si le modèle adopté par le gestionnaire est différent, il est conseillé de joindre au DCE un modèle-type de rapport d'inspection avec des indications sur le contenu minimal que l'on souhaite y voir figurer et d'indiquer ici « Toutes les observations réalisées lors de l'inspection sont consignées dans un rapport établi suivant le modèle joint au dossier de consultation des entreprises (DCE). »]

Le rapport complète et interprète les levés d'intrados en fournissant une description des dégradations et une analyse des désordres avec la recherche des causes. Il comporte une conclusion sur l'ensemble des observations réalisées.

Il formule des recommandations sur les campagnes d'entretien (courant ou spécialisé). Il liste les points à surveiller, l'instrumentation à mettre en place ainsi que des investigations complémentaires à mener, le cas échéant. Il indique la nature des travaux de réparations à réaliser éventuellement.

Il est illustré par des documents photographiques et des schémas pour faciliter la compréhension de la description des défauts et des désordres.

Le rapport d'inspection propose au maître d'œuvre une cotation IQOA-Tunnels (Image de la qualité des ouvrages d'art) de l'ouvrage par zones.

La codification des désordres sur les levés doit respecter les prescriptions du Fascicule 40 et la codification proposée dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » édité par le CETU.

Le rapport, dans une version provisoire, est remis dans un délai de XXX mois à compter de la visite sur site. Le maître d'œuvre dispose alors d'un délai de deux semaines pour l'analyser et faire ses remarques.

[Il est conseillé d'encadrer dans l'acte d'engagement, le CCAP ou le CCTP les différents délais pour la remise du rapport « minute », la tenue de la réunion et la remise du rapport définitif ainsi que les délais que s'accorde le gestionnaire pour la relecture et la validation de la prestation – à titre indicatif, un délai de 3 mois peut être nécessaire entre la visite et la remise du rapport définitif.]

1.3.5 Réunion de présentation

La présentation du rapport d'inspection fait l'objet d'une réunion organisée avec les services organisationnel et opérationnel du maître d'ouvrage gestionnaire.

Le rapport en version « minute » doit être transmis au service organisationnel au minimum 15 jours avant la réunion.

Au cours de cette réunion, le titulaire devra :

- commenter le rapport et ses conclusions,
- expliciter la nature des entretiens ou des réparations recommandées,
- justifier la cotation IQOA-Tunnels proposée.

Le titulaire présente aussi, au cours de la réunion, les éventuelles investigations complémentaires à prévoir pour mieux identifier les désordres, leurs causes et leur évolution possible. Il décrit les actions de surveillance qu'il recommande.

Il donne le degré d'urgence des actions d'entretien ou de réparation qu'il préconise d'entreprendre pour assurer la pérennité ou la mise en conformité de l'ouvrage.

Au cours de cette réunion, la proposition de cotation IQOA-Tunnels devra être discutée, en particulier la cotation « Eau » qui devra être ajustée.

A l'issue de la réunion et à réception des observations du maître d'ouvrage, le titulaire procède aux modifications et ajustements du rapport et lui remet la version définitive conformément à l'article « 2.6 – Documents à remettre » dans un délai de XXX semaines.

ARTICLE 2 – CONTENU DU RAPPORT

2.1 – Données mise à la disposition du titulaire

Sont remis ou communiqués au titulaire du marché, dès la passation de la commande :

- les documents synthétiques présentant l'ouvrage, expliquant son mode de construction, ainsi que les plans et profils en travers selon les sections,
- le précédent rapport d'inspection détaillée,
- le compte-rendu des investigations complémentaires effectuées depuis la dernière inspection.

➤ *Liste à compléter ou à modifier.*

Le contenu du dossier d'ouvrage est donné en pièce X.X du DCE. Le titulaire peut le consulter ou obtenir des copies ou exemplaires numériques de tous les documents pouvant faciliter sa mission d'inspection en prenant contact avec :

➤ *Coordonnées (adresse, tel., mél d'un correspondant identifié).*

2.2 – Cadre du rapport d'inspection

Le rapport d'inspection doit reprendre tous les points indiqués dans le cadre donné à l'annexe 12 du « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » édité par le CETU.

[Si le modèle adopté par le gestionnaire est différent, il faut indiquer ici « Un cadre-type de rapport et le contenu minimum devant y figurer sont donnés en pièce X.X du DCE. »]

La présentation du rapport (page de garde, mise en page, polices, styles de textes...) doit respecter la charte graphique dont les éléments et un exemple seront fournis au lancement de la prestation.

Le rapport doit être rédigé de façon claire et aérée, accompagné en tant que de besoin de schémas et photographies nécessaires à la compréhension.

Les documents écrits (notices, documents explicatifs, tableaux, petits schémas, etc) peuvent être au format A4 (« portrait » ou « paysage ») ou éventuellement en A3 « paysage ».

2.3 – Levés des désordres

Les levés doivent mettre en évidence tous les défauts et les désordres du tunnel, quelles que soient leur nature et leur gravité.

Le service organisationnel (maître d'œuvre) met à disposition du titulaire tous les fichiers informatiques qu'il possède sur le tunnel, notamment les levés *sous format AutoCad (préciser la version)* de l'inspection détaillée précédente. Le titulaire réalise les plans manquants. Il complète ou modifie les plans erronés. La réalisation des plans manquants ou l'adaptation des plans existants pour l'exécution du présent marché sont à la charge du titulaire.

Les levés réalisés sur site sont numérisés sur support informatique, exploitable par le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre (*compatible avec AutoCad (version à préciser) ou tout autre logiciel utilisé par le maître d'ouvrage*). Le support informatique exploitable permet la diffusion, la production et la modification éventuelle des documents par le maître d'œuvre.

Chaque type de dégradation ou de désordre est reporté sur un plan qui lui est propre, et caractérisé par une couleur. Le dessin final est constitué par la juxtaposition des différents plans.

Le document informatisé, remis par le titulaire, doit permettre les restitutions des plans (ou calques) suivants :

- provenant des précédentes inspections, dans la mesure où ces éléments ont été fournis par le service organisationnel :
 - fond de plan : dessin de l'ouvrage à échelle non déformée,
 - plans Texte : il comprend les textes servant à la définition de l'ouvrage et relatifs aux observations réalisées lors des inspections antérieures (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des fissures longitudinales (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des fissures transversales (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des fissures obliques (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des zones instables (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des zones purgées (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des zones sonnante creux (un plan pour chaque date d'inspection),
 - plans des zones présentant d'autres types de désordres (concrétions, ragréages, cavités, nids de cailloux,...) (un plan pour chaque date d'inspection et chaque type de désordre).

➤ *Liste à compléter.*

- provenant de l'inspection détaillée, objet de ce marché :
 - plan Texte : il comprend les textes relatifs à diverses observations réalisées lors de l'inspection,
 - plans des nouvelles fissures longitudinales,
 - plans des nouvelles fissures transversales,
 - plans des nouvelles fissures obliques,
 - plans des nouvelles zones instables,
 - plans des nouvelles zones purgées,
 - plans des nouvelles zones sonnante creux,
 - plans des nouvelles zones présentant d'autres types de désordres (un plan pour chaque type de désordre).

➤ *Liste à compléter.*

Les défauts ou désordres relevés lors des précédentes inspections seront dans des plans différents mais avec une même couleur grise (de préférence).

La codification des désordres est conforme à celle définie dans le « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » édité par le CETU.

2.4 – Illustrations photographiques

Le rapport comprend des photographies d'ensemble des parties visitées et des têtes de l'ouvrage ainsi que des photographies de détail chaque fois que cela est nécessaire à la compréhension des observations effectuées.

Elles sont placées dans le rapport en regard des observations correspondantes. Un système de numérotation et de légende doit permettre de retrouver une photographie dans le rapport à partir d'une indication sur les levés et inversement. Les photographies de détail intègrent un repère d'échelle dans leurs champs.

Les photographies originales seront remises sur support informatique en fin de mission. Les photographies intégrées au rapport ou sur les plans de levés peuvent être recadrées si nécessaire mais dans tous les cas redimensionnées au format informatique maximum 640x480 pixels.

2.5 – Cotation IQOA-Tunnels

L'évaluation et la proposition de cotation IQOA-Tunnels des zones sont remises avec le rapport sous la forme d'une fiche de cotation IQOA-Tunnels du génie civil dont un exemple est fourni dans l'annexe 13 du « Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers » édité par le CETU.

2.6 – Documents à remettre

Les levés d'intrados et le rapport d'inspection sont remis en 4 exemplaires : 3 sur support papier et un sur support informatique.

Les échelles doivent être identiques pour tous les levés. L'échelle d'impression des plans sur support papier est 1/100^{ème}. Les plans sont présentés soit sous forme de cahiers A3 ou A4, soit sous forme de plans pliés au format A4 et dont les dimensions ne dépassent pas celles du format standard A0.

Il est demandé de rassembler, pour l'ensemble du tunnel, la totalité des données du rapport (textes, tableaux, schémas, plans, levés et photographies) à l'aide du logiciel libre de droit « Adobe Acrobat Reader » en lecture seule (extension du fichier : .pdf).

Toutes les données doivent aussi être enregistrées séparément pour une utilisation ultérieure. Les levés des désordres sont joints au format « pdf » et « dwg » (*AutoCad version à préciser*). Le rapport est enregistré sous un format exploitable avec les suites logicielles *OpenOffice* ou *Microsoft Office*. Les images sont au format JPEG (extensions .jpg ou .jpeg).

Toutes les données informatiques sont rassemblées sur un CDROM ou un DVDROM.

ARTICLE 3 – CONDITIONS DE REALISATION DE L'INSPECTION

3.1 – Planning d'intervention

Le planning d'intervention, y compris les phasages, les basculements et les coupures de circulation (dossier d'exploitation sous chantier) est établi par le titulaire et soumis à l'agrément du service opérationnel. Le planning d'intervention doit respecter les contraintes d'exploitation. La fourniture, la pose et la dépose de la signalisation adéquate sont à la charge du titulaire.

Le service opérationnel, dans le cadre des impératifs d'exploitation, peut être amené à suspendre ou reporter certaines interventions. Dans tous les cas, la nature des modifications, ses causes et les solutions envisagées sont consignées dans le journal d'intervention.

Si l'emprise du chantier s'étend sur des voies riveraines, le titulaire doit, en coordination avec les gestionnaires concernés, réaliser à ses frais toutes les démarches administratives nécessaires, ainsi que la fourniture, la pose et la dépose de la signalisation adéquate.

La signalisation temporaire doit être conforme à la réglementation en vigueur (8^{ème} partie de l'Instruction interministérielle sur la sécurité routière (IISR)) et les schémas du dossier d'exploitation sous chantier (DESC) doivent être établis à partir des préconisations des guides techniques « Signalisation temporaire » (volumes 1 à 8) édités par le Sétra.

➤ *Ce point doit être adapté si la réalisation du dossier d'exploitation sous chantier, les démarches nécessaires à l'obtention des arrêtés de circulation et la signalisation de chantier sont assurées par le gestionnaire du tunnel.*

3.2 – Contrainte d'exploitation et de réalisation

➤ *Préciser ici les plages horaires permettant le travail, les conditions de circulation (fermeture complète, voies neutralisées), les conditions d'accès aux gaines, les délais d'évacuation...*

Le titulaire doit, conformément aux contraintes d'exploitation, adapter et justifier les moyens d'observations qu'il compte utiliser. Les prix du présent marché sont réputés inclure les sujétions dues aux contraintes d'exploitation (*travail de nuit, travail sous alternat de circulation, éclairage adapté aux conditions d'intervention...*).

Le gestionnaire peut à tout moment imposer l'annulation ou l'interruption immédiate de l'inspection sur site pour les cas suivants : accident dans le tunnel, incendie en tunnel, conditions météorologiques anormales, manœuvre ou exercices inopinés, pointe de circulation anormale (*indemnités à préciser*).

Toute visite sur le site de personnes étrangères à l'équipe d'inspection est soumise à l'agrément du maître d'œuvre.

Les représentants du maître d'œuvre et du gestionnaire peuvent s'intégrer dans les équipes d'inspection du titulaire et suivre leur évolution.

3.3 – Accès au chantier

Le titulaire doit respecter les règles de sécurité définies dans le plan général de coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (PGCSPS) (*ou de la « Notice particulière »*) et précisées dans son plan particulier en matière de sécurité et de protection de la santé (PPSPS). Il doit, en outre, suivre les consignes du gestionnaire données avant l'intervention.

Le titulaire doit également respecter les consignes de sécurité et d'organisation données par les gestionnaires des autres domaines publics impactés par les travaux d'inspection. Il doit transmettre une copie de ces consignes au maître d'œuvre avant toute intervention.

3.4 – Journal d'intervention

Le titulaire renseigne un journal d'intervention où sont indiqués :

- les moyens humains et matériels en place,
- la météorologie,
- les zones inspectées,
- les différents problèmes rencontrés,
- éventuellement, les nouvelles directives du service organisationnel,
- éventuellement, les nouvelles contraintes de réalisation.

➤ *Ce point doit être adapté au tunnel. Il convient de demander un journal de chantier pour un tunnel long nécessitant plus d'une semaine d'inspection ou pour un tunnel présentant de fortes contraintes d'intervention.*

ARTICLE 4 – PERSONNELS

➤ *La qualification minimale du personnel réalisant les prestations du marché est à adapter en fonction des phases du marché.*

4.1 – Qualification

Le personnel doit avoir suivi une formation qualifiante spécifique à l'inspection des ouvrages et doit avoir, au minimum, les qualifications suivantes :

- pour un agent d'inspection ou aide :
 - un an d'expérience en inspection et des connaissances en génie civil ;
- pour un inspecteur ou chargé d'études :
 - titulaire d'un diplôme équivalent de niveau IV (baccalauréat) : trois ans d'expérience en inspection et des connaissances en génie civil, géotechnique et pathologie des ouvrages d'art ;
 - titulaire d'un diplôme de niveau III (BTS, DUT) dans le domaine du génie civil : un an d'expérience et des connaissances en géotechnique et pathologie des ouvrages d'art ;
- pour le responsable de l'équipe de constatation sur site :
 - titulaire d'un diplôme de niveau III (BTS, DUT) dans le domaine du génie civil : trois ans d'expérience en inspection, ainsi que des connaissances en géotechnique et pathologie des ouvrages d'art ;
 - titulaire d'un diplôme d'ingénieur dans le domaine du génie civil : un an d'expérience en inspection ainsi que des connaissances en géotechnique et en pathologie des ouvrages d'art ;
- pour le responsable d'inspection :
 - titulaire d'un diplôme d'ingénieur dans le domaine du génie civil : un an d'expérience en inspection ainsi que des connaissances en géotechnique et en pathologie des ouvrages d'art.

➤ *Dans le cas de tunnels non revêtus ou lorsque la géologie de la zone d'influence présente des facteurs de désordre importants pour le tunnel, il convient d'intégrer à la liste du personnel un agent géologue ou pouvant attester d'une formation en géologie.*

4.2 – Ensemble de la prestation

L'inspection détaillée doit être conduite par un agent qualifié de niveau ingénieur ayant obligatoirement reçu une formation spécialisée. Cet agent est chargé de représenter le titulaire auprès du service organisationnel et, à ce titre, peut signer tout document relatif à la prestation.

Il dirige la rédaction du rapport. Il a la responsabilité des analyses et des conclusions qui y sont contenues.

Le nom de cet agent, et ceux des agents intervenants pour chacune des phases définies ci-après, sont communiqués au maître d'œuvre avant le début de la première phase. Tout changement ultérieur d'agents doit être soumis à l'agrément du maître d'œuvre.

Le titulaire doit justifier l'expérience et les compétences de ses agents. À cet effet, il doit fournir les curriculum vitae de l'équipe d'inspection qui sera réellement sur le terrain et du responsable de l'inspection.

4.3 – Préparation de l'inspection

Pour cette phase, le titulaire constitue une équipe composée au moins du responsable de l'inspection, du responsable de l'équipe de constatations sur site (étude des documents existants sur l'ouvrage, analyses des inspections précédentes, participation à la pré-visite) et d'une aide (préparation des fonds de plans).

4.4 – Inspection détaillée sur site et réunion-bilan

Pour cette phase, le titulaire constitue une équipe composée au moins du responsable de l'équipe de constatations sur site, d'un second inspecteur et d'un agent d'inspection (pour le martelage manuel et pour la conduite des engins...).

4.5 – Etablissement du rapport d'inspection

Pour cette phase, le titulaire constitue une équipe composée au moins du responsable de l'inspection (synthèse et validation du rapport) et du responsable de l'équipe de constatations sur site (rédaction du rapport).

Le rapport est contrôlé par le maître d'œuvre. En cas d'erreur, le titulaire doit assurer la reprise de la partie erronée.

4.6 – Réunion de présentation

Pour cette réunion, le titulaire est représenté au minimum par le responsable de l'inspection (rendu du rapport, proposition de la cotation IQOA) et le responsable de l'équipe de constatations sur site.

ARTICLE 5 – MATÉRIELS

Le titulaire fournit les matériels nécessaires à l'exécution de l'inspection. Le marché prend en compte l'amenée sur l'ouvrage et le repliement en fin de travaux de tous les moyens, produits et outils nécessaires à la bonne réalisation des prestations.

En particulier, il a à sa charge la fourniture et la mise en œuvre de tous les moyens d'accès (nacelle...) pour permettre d'approcher à moins d'un mètre des parements du tunnel (les inspecteurs doivent avoir « la main » sur l'ouvrage). Les moyens d'éclairage doivent permettre une vision parfaite des lieux dans toutes les directions, tant dans les parties circulées que dans les gaines.

Leur choix est soumis à l'agrément du maître d'œuvre et doit tenir compte des contraintes liées à l'exploitation du tunnel, des problèmes de sécurité listés lors de la pré-visite et de la gêne à la circulation qu'ils peuvent occasionner.

➤ *À adapter suivant les conditions particulières d'intervention sur le tunnel*

Les matériels employés par le titulaire doivent être utilisés conformément aux spécifications du constructeur et aux recommandations des organismes de contrôle et de sécurité. Ils doivent être adaptés aux conditions particulières de travail dans le tunnel.

Les vérifications réglementaires sont réalisées à la diligence et aux frais du titulaire. En cas d'absence ou d'insuffisance de ces vérifications, l'utilisation du matériel incriminé est interdite.

En cas d'incertitude sur le respect des règles d'utilisation, le maître d'œuvre procède à tous les contrôles qu'il juge utile. Si le non-respect des règles est avéré, les frais des contrôles sont à la charge du titulaire.

Le personnel de conduite des engins doit être formé et titulaire de tous les certificats et agréments nécessaires à leur utilisation (permis de conduire légaux, autorisations de conduite...).

L'outillage électrique utilisé est de classe II avec protection 30 mA.

Les échelles ou escabeaux sont interdits pour l'inspection (*sauf pour des accès ponctuels à des niches, aux étages supérieurs de certaines galeries d'évacuation, mesures ponctuelles de fissuromètres...*).

Tout le personnel d'intervention est équipé des équipements de protection individuels et d'un gilet de signalisation à haute visibilité de classe 2 (conforme à la norme NF EN 471) de couleur jaune.

Les parties latérales ou saillantes des véhicules opérant sur le site sont marquées de bandes rouges et blanches rétro réfléchissantes. Les véhicules présents sur le site d'inspection, le desservant ou stationnant en limite de la chaussée, portent une plaque « service » rétrofléchissante de classe 2. Les véhicules doivent être pourvus de feux spéciaux prévus à l'article 122 (paragraphe C) de la 8^{ème} partie de l'IISR de novembre 2008.

➤ *Les éléments ci-après sont à intégrer au présent document et à adapter suivant les cas :*

Pour l'inspection des usines de ventilation, le titulaire doit prévoir des moyens matériels et personnels complémentaires pour des travaux en grande hauteur.

Les interventions en gaines techniques, en gaines de ventilation ou en locaux fermés ne peuvent s'effectuer qu'après un repérage complet des réseaux existants. Les intervenants doivent être équipés d'un détecteur de monoxyde de carbone (CO) avec alarme sonore, pour prévenir les risques d'asphyxie.

Les puits de ventilation sont visités par des cordistes dûment habilités munis des équipements de protection individuels adaptés. Les interventions se font par binôme (un cordiste en inspection dans le puits, le second à l'extérieur) en liaison radio permanente. Les cordes font l'objet d'un examen détaillé avant intervention. Le cordiste en intervention dans le puits est, en outre, équipé d'un éclairage frontal et d'un masque de protection contre les remontées intempestives de fumée.

Pour l'intervention dans les locaux électriques, le personnel doit avoir les habilitations réglementaires.

ARTICLE 6 – QUALITE

➤ *Les exigences du maître d'ouvrage en terme d'assurance de la qualité peuvent être adaptées à l'importance du ou des ouvrages à inspecter.*

Le plan qualité (PQ) précise, avant l'exécution des prestations et sur tous les points particuliers, les méthodes et moyens d'exécution mis en œuvre pour l'obtention de la qualité requise. Il revêt un caractère évolutif durant l'exécution des prestations.

6.1 – Établissement du plan qualité (PQ)

Le plan qualité indique les méthodes et moyens mis en œuvre par le prestataire pour la bonne exécution de la mission qui lui est confiée.

Le PQ s'appuie sur les prescriptions et spécifications du présent CCTP et les textes qui y sont cités (normes, instructions, guides techniques). Il définit les modalités d'exécution du contrôle intérieur mis en place dans l'entreprise, les contraintes liées à l'exécution du contrôle extérieur et notamment les points d'arrêt (ou d'étape) qui nécessitent l'accord formel du maître d'œuvre avant de poursuivre la mission.

Le PQ est établi par le titulaire et soumis pour acceptation au maître d'œuvre au cours de la période de préparation et au plus tard XXX jours avant la date prévue pour l'intervention sur le site. Il est éventuellement révisé et complété au cours de la prestation, pour tenir compte de son évolution.

➤ *Le délai accordé au titulaire pour l'élaboration du plan qualité doit être fixé dans le CCTP et rappelé dans le CCAP ou inversement.*

Les compléments au PQ élaborés en cours de mission sont soumis à l'acceptation du maître d'œuvre dans les mêmes conditions que la version initiale.

6.2 – Composition du plan qualité

Le plan qualité comprend les informations suivantes :

- rappel de mission confiée au titulaire (tunnel concerné, lieu d'exécution, description sommaire de l'ouvrage et des différentes parties à inspecter...);
- rappel des différents intervenants : maîtrise d'ouvrage (niveaux décisionnel, organisationnel et opérationnel), maîtrise d'œuvre, contrôle extérieur, coordonnateur SPS le cas échéant, sous-traitants éventuels... ;
- l'organisation générale du titulaire et l'organigramme spécifique mis en place pour la mission : noms, CV, qualifications du responsable d'inspection, du responsable des constatations sur site et des différents inspecteurs ;
- les modalités du contrôle intérieur mis en place dans l'entreprise, le circuit et les délais de transmission des différents documents à établir dans le cadre de la mission.

Le plan qualité détaille également les moyens matériels dont dispose le titulaire et ceux qui seront affectés à l'affaire ainsi que les méthodes d'exécution des différentes étapes de la mission d'inspection.

6.3 – Étapes de la mission à décrire au plan qualité

Les différentes étapes devant faire l'objet d'une procédure d'exécution dans le plan qualité sont :

- préparation de l'inspection : recueil et analyse des documents existants, établissement du dossier d'exploitation, préparation des supports...
- inspection sur site : phasage de la visite, parties circulées ou non, coordination des équipes, gestion des temps de parcours, d'échanges de repos...
- rapport d'inspection : interface entre les constatations sur site, analyse et l'interprétation au bureau, restitution au gestionnaire.

Les procédures d'exécution mentionnent le type de contrôle intérieur prévu (interne, externe) avec les résultats à obtenir. Elles seront complétées par le maître d'œuvre pour le contrôle extérieur.

Chaque procédure définit des points d'arrêt soumis à l'agrément du maître d'œuvre.

6.4 – Contrôle extérieur

Le contrôle extérieur du maître d'œuvre consiste en :

- la vérification du respect du plan qualité de l'entreprise et notamment la pertinence du contrôle intérieur,
- la validation des points d'étapes avant poursuite de la mission,
- l'assistance au maître d'ouvrage pour l'acceptation des documents émis par le titulaire.

Le titulaire doit respecter les délais d'intervention et d'analyse du contrôle extérieur et respecter les levées de point d'arrêt avant l'exécution des prestations correspondantes.

Ces contrôles ne dispensent pas le titulaire de son contrôle intérieur. En cas de défaillance, le maître d'œuvre fait intervenir son contrôle extérieur, après mise en demeure restée sans effet. Les frais correspondants sont à la charge du titulaire.

Le contrôle extérieur de la mission est assuré par XXX *[Si le maître d'œuvre n'effectue pas lui-même le contrôle extérieur de la mission].*

Pour l'exécution du contrôle extérieur, le maître d'œuvre est assisté par XXX *[Si le maître d'œuvre effectue lui même partiellement le contrôle extérieur de la mission.]*

➤ *Pour les tunnels du réseau national non concédé, les inspections qui ne sont pas effectuées par le CETU doivent faire l'objet d'un contrôle extérieur par un établissement du Réseau scientifique et technique du ministère en charge des infrastructures routières.*

Sur demande du maître d'ouvrage, le titulaire de la mission peut être soumis à un audit réalisé par le contrôle extérieur qui consiste en une revue documentaire du système qualité et de son application, la vérification des méthodes et matériels employés pour les inspections, le contrôle et l'analyse des documents émis (notamment rapport d'inspection détaillée, cotation IQOA-Tunnels) et, éventuellement, des visites sur site.

➤ *L'audit est une procédure contraignante qui doit être réservée aux titulaires de marchés d'inspections importants ou pluriannuels.*

ANNEXE 3 : CONDITIONS DE SÉCURITÉ À RESPECTER LORS DES ACTIONS DE SURVEILLANCE ET D'ENTRETIEN PROGRAMMÉES – DIFFICULTÉS SPÉCIFIQUES D'INTERVENTION

Nota : cette annexe reprend l'annexe 1, en ce qui concerne les interventions dans les tunnels creusés, du Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements » d'octobre 2012.

10.3.1 Préambule

Conformément au décret 94-1159 du 26 décembre 1994, le niveau organisationnel ou le niveau opérationnel communique aux entreprises ou administrations intervenant sur un chantier d'inspection le plan général de coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (PGCSPS). Il a pour objet de définir les mesures de sécurité que les entreprises doivent scrupuleusement respecter à l'occasion de leur travail ou de leurs déplacements, en vue d'éviter les risques d'accidents. Chaque entreprise doit, à son tour, établir un plan particulier en matière de sécurité et de protection de la santé (PPSPS) qui adapte les principes du PGCSPS à la nature des travaux qu'elle exécute.

Le PPSPS a pour objet de définir les mesures essentielles que doit prendre l'entreprise pour assurer la sécurité de son propre personnel, ainsi que celle des usagers de la voie concernée et des personnes étrangères au chantier autorisées à y accéder. Le document concerne également les mesures de maintien en excellent état de marche et d'entretien du matériel, des véhicules et des installations utilisés sur toute l'étendue du chantier.

Dans les cas où le PGCSPS n'est pas obligatoire, il est recommandé au service en charge de l'exploitation de la voirie d'établir une « Notice Particulière » comprenant au minimum :

- l'identification des risques (en particulier la configuration du tracé pour les problèmes de visibilité),
- les précautions à prendre pour gérer l'évacuation des gaz polluants et des poussières,
- les conditions d'éclairage,
- la gestion des liaisons entre les intervenants et l'extérieur,
- les consignes d'intervention.

10.3.2 Les risques d'accidents du travail – La réglementation

Indépendamment de la bonne observation du Code du Travail et de celui de la Sécurité Sociale, les entreprises ou les administrations qui interviennent sur des chantiers en tunnel doivent respecter la réglementation spécifique mise en place afin d'empêcher les risques d'accidents.

Les dispositions à prévoir et les dispositions légales générales d'hygiène et de sécurité qui régissent cette réglementation sont répertoriées dans l'annexe 7 du Fascicule 2 « Généralités sur la surveillance » de l'ITSEOA.

L'actualisation de cette réglementation est faite par le dictionnaire permanent « sécurité et conditions de travail » qui fait l'objet d'une mise à jour continue.

Ces règles ne concernent que les interventions programmées, en relation avec la surveillance et l'entretien courant. Les situations d'urgence sont régies par leur propre réglementation.

10.3.3 Dispositions particulières – Mesures de sécurité

Les interventions en tunnel

Les interventions en tunnel comportent généralement des dangers supérieurs à ceux des travaux à l'air libre, tant par leur nature qu'en raison des niveaux réduits d'éclairage, de la présence de zones d'ombre diminuant la visibilité, de l'humidité réduisant les coefficients d'adhérence, du confinement latéral rendant les manœuvres plus délicates, de la pollution...

Toutes les dispositions appropriées pour les éviter doivent être prises en temps utile. Le service en charge de l'exploitation de la voie doit toujours examiner si la circulation peut être maintenue en toute sécurité, compte tenu de la nature des travaux et de leurs éventuelles répercussions aussi bien sur les conducteurs que sur les acteurs de la surveillance et de l'entretien.

Lors des inspections périodiques, pour des raisons d'hygiène et de sécurité, il est très fortement recommandé que le tube inspecté soit totalement fermé à la circulation.

En dehors des prescriptions réglementaires concernant la signalisation temporaire nécessitée par les chantiers, les dispositions complémentaires suivantes sont à prendre :

- éclairage fixe du tunnel (quand il existe) : mise au régime maximal pendant toute la durée du chantier et sur toute la longueur de l'ouvrage, sauf si celui-ci fait plusieurs kilomètres,
- emprise du chantier : éclairage général avec des moyens puissants pour visualiser la voûte et, si la circulation n'est pas fermée, attirer de loin l'attention des conducteurs,
- signalisation de position et signalisation routière temporaire : même dans les tunnels équipés d'un éclairage fixe, les signaux et panneaux réglementaires, qui sont normalement réflectorisés, doivent être éclairés ou munis de feux à éclats synchronisés.

Il est à noter qu'en matière de balisage, il est interdit de débiter un balisage de neutralisation de voie (biseau) à l'intérieur d'un tunnel. La pré-signalisation et le biseau de réduction de voie sont obligatoirement effectués avant l'entrée dans le tunnel.

Le service en charge de l'exploitation de la voie doit examiner l'opportunité d'une limitation de la vitesse plus stricte qu'à l'air libre en fonction de la nature des travaux, des conditions d'éclairage et de balisage possibles dans le tunnel.

Les mesures à prendre contre la pollution produite par les différents engins de chantier, et prévues dans le PPSPS, doivent en principe suffire pour que les usagers, qui ne séjournent qu'un temps relativement court dans l'ouvrage, ne soient pas gênés. Elles doivent aussi suffire pour les personnels intervenant dans le tunnel.

Toutefois, en cas de circulation alternée, de ralentissement ou d'arrêt prolongé, le service en charge de l'exploitation de la voie veille à ce que les usagers et les personnels intervenant dans le tunnel ne soient pas gênés tant par les dégagements de polluants propres au chantier que par ceux provenant des véhicules eux-mêmes.

Il est souhaitable que les engins d'intervention utilisés pour effectuer les inspections soient équipés d'un dispositif efficace d'épuration des gaz d'échappement (catalyse, barbotage).

Enfin, l'outillage électrique utilisé est de classe II avec protection 30 mA.

Les interventions dans les gaines et dans les puits de ventilation

Les interventions dans les gaines techniques et de ventilation ne peuvent s'effectuer qu'après un repérage complet des réseaux existants. Les intervenants doivent être équipés d'un détecteur de CO avec alarme sonore pour prévenir les risques d'asphyxie.

L'inspection de ces espaces confinés pouvant être très longue, elle ne doit se faire qu'en l'absence de circulation dans le tube et après une ventilation forcée de plusieurs minutes, destinée à renouveler l'atmosphère.

Les puits de ventilation sont inspectés par des cordistes habilités munis des équipements de protection individuels (EPI) adaptés. Les interventions se font par binôme (un seul cordiste en inspection, l'autre à l'extérieur du puits), en liaison radio permanente. Les cordes font l'objet d'un examen détaillé avant intervention.

Le cordiste d'intervention est, par ailleurs, équipé d'un éclairage frontal et d'un masque de protection pour lutter contre des remontées intempestives de fumée.

10.3.4 Plan de prévention-type

Nature de l'opération :
Lieu de l'opération :
Dates prévues : début et fin des travaux.....

MAITRE D'OUVRAGE Nom : Adresse :
Tél :

ENTREPRISE EXTERIEURE Raison sociale : Adresse : Date de la commande : Nature des travaux : Lieu d'intervention : Date prévue de début de travaux : Date prévue de fin de travaux : Nom et qualification du responsable des travaux : Effectifs travaillant sur le site :

LISTE DES POSTES RELEVANT D'UNE SURVEILLANCE MEDICALE PARTICULIERE

ORGANISATION DES PREMIERS SECOURS
--

CONSIGNES DE SECURITE A RESPECTER SUR LE SITE DES TRAVAUX
--

MODALITES D'INFORMATION DES SALARIES INTERVENANT SUR LE SITE PAR LE RESPONSABLE DES TRAVAUX

10.3.5 Les risques et leurs moyens de prévention

Définition des risques	Moyens de prévention
Heurts par véhicules	<ul style="list-style-type: none"> • Équiper tous les véhicules de l'entreprise d'un marquage arrière, de bandes rétro-réfléchissantes, de gyrophare orange • Porter des protections individuelles (tenues conformes aux normes en vigueur) • Mettre en place la signalisation temporaire • Faire mettre, par l'exploitant, l'éclairage au maximum de sa puissance dans le tunnel
Blessures causées par rupture de canalisations existantes en service (eau, gaz, électricité)	<ul style="list-style-type: none"> • Repérer les réseaux existants • Afficher les mentions « Ne pas toucher » ou « Ne pas déplacer »
Asphyxies, fumées	<ul style="list-style-type: none"> • Détecter le CO • Pratiquer un aérage • Utiliser les masques de protection à filtres
Bruit	Porter les protections auditives
Chutes de grande hauteur	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un matériel certifié (nacelle élévatrice ou échafaudage) avec un personnel disposant du certificat d'aptitude à la conduite en sécurité (CACES) correspondant au matériel employé • Pour les conducteurs de matériels, avoir une autorisation de conduite de l'employeur • Utiliser un harnais de sécurité
Incidents en cours d'opération dans les puits, les gaines ou tous autres lieux difficiles d'accès.	<ul style="list-style-type: none"> • Intervenir par binôme avec : <ul style="list-style-type: none"> - dans le cas des puits verticaux, un seul cordiste en inspection, le deuxième à l'extérieur du puits - une liaison radio permanente - un harnachement contrôlé et vérifié - une corde de secours
Remise en route intempestive de la ventilation en cours d'opération dans les gaines techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Faire condamner les automatismes de commande de la ventilation par l'exploitant
Électrocution ou électrisation	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un appareillage de classe II et protégé 30 mA • Rappeler et appliquer les mesures de sécurité relatives aux travaux au voisinage d'installations électriques (mises hors tension et respect des distances de sécurité)
Coupure d'éclairage	Se munir d'un éclairage de secours frontal

ANNEXE 4 : PROFILS EN TRAVERS CARACTÉRISTIQUES AU FIL DES ÉPOQUES

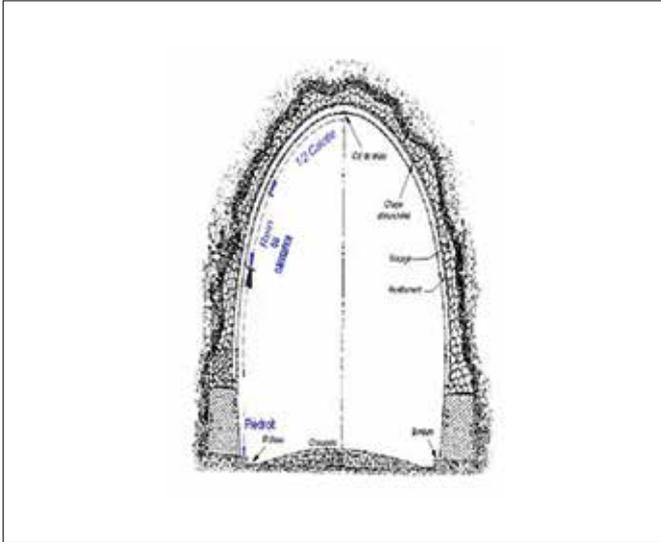


Figure 1 : demi-ellipse verticale (Lioran, 1847)

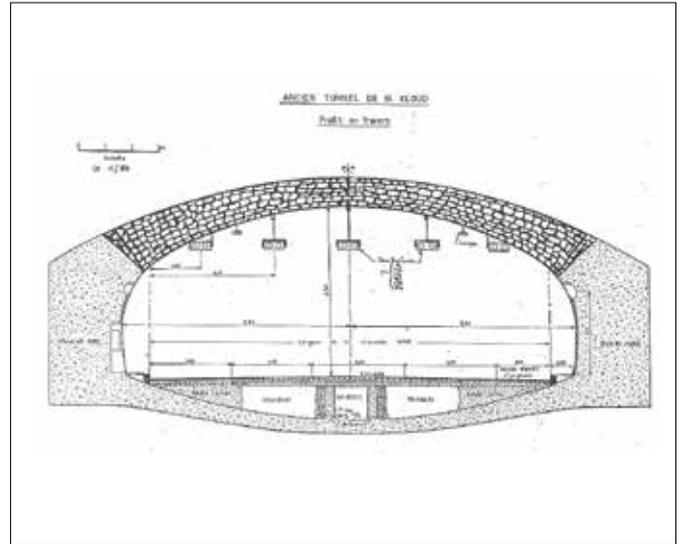


Figure 2 : voûte surbaissée de grande largeur (Saint-Cloud, 1941)

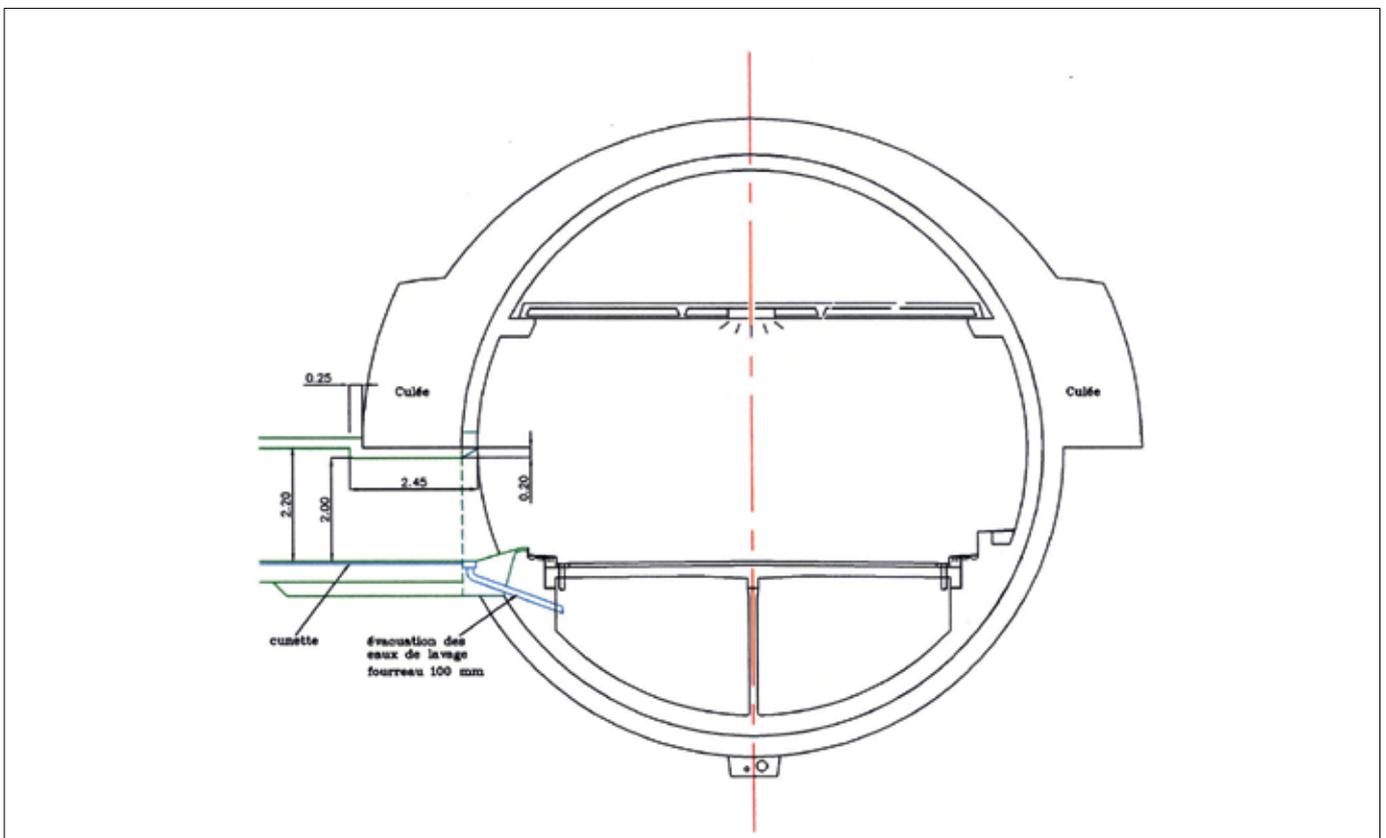


Figure 3 : double voûte circulaire emboîtée (Lyon-Fourvière, 1971)

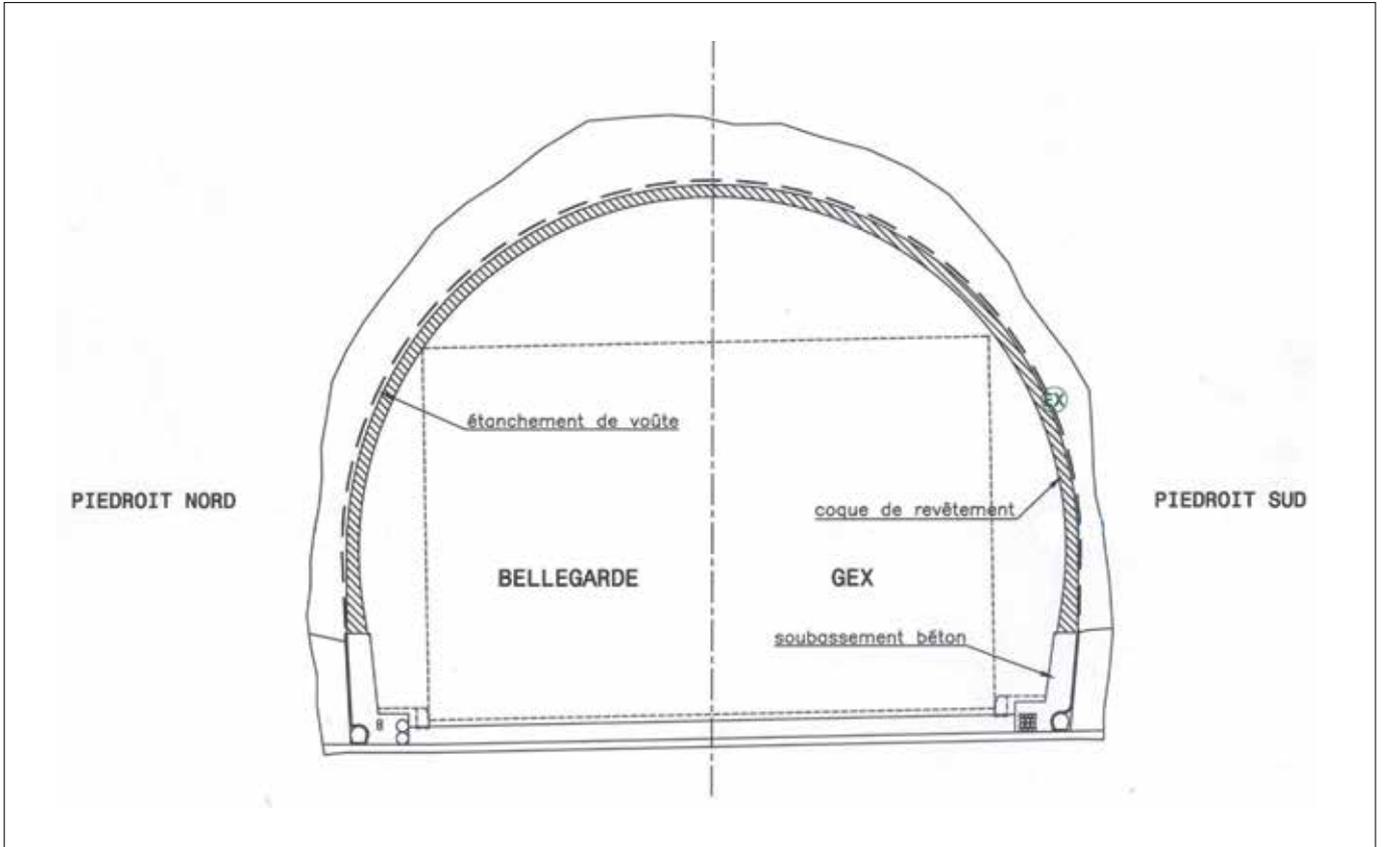


Figure 4 : coque autoporteuse (Fort l'Ecluse, 1994)

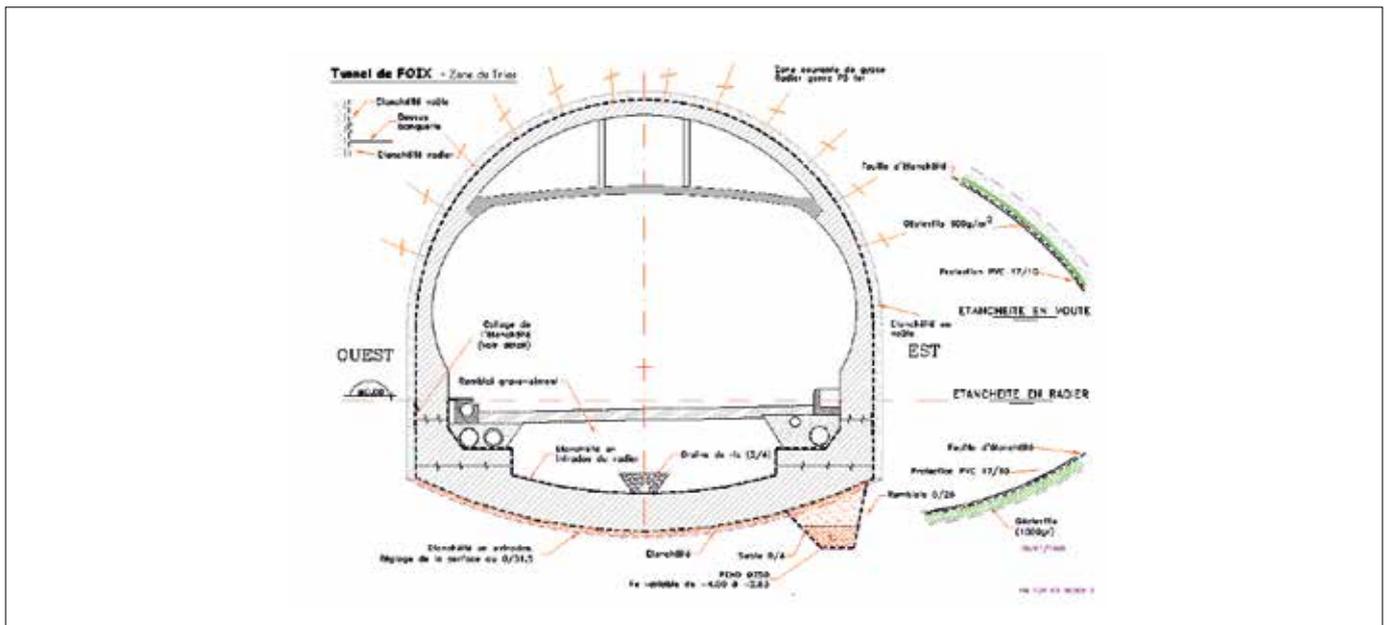


Figure 5 : voûte et contre-voûte (Foix, 1999)

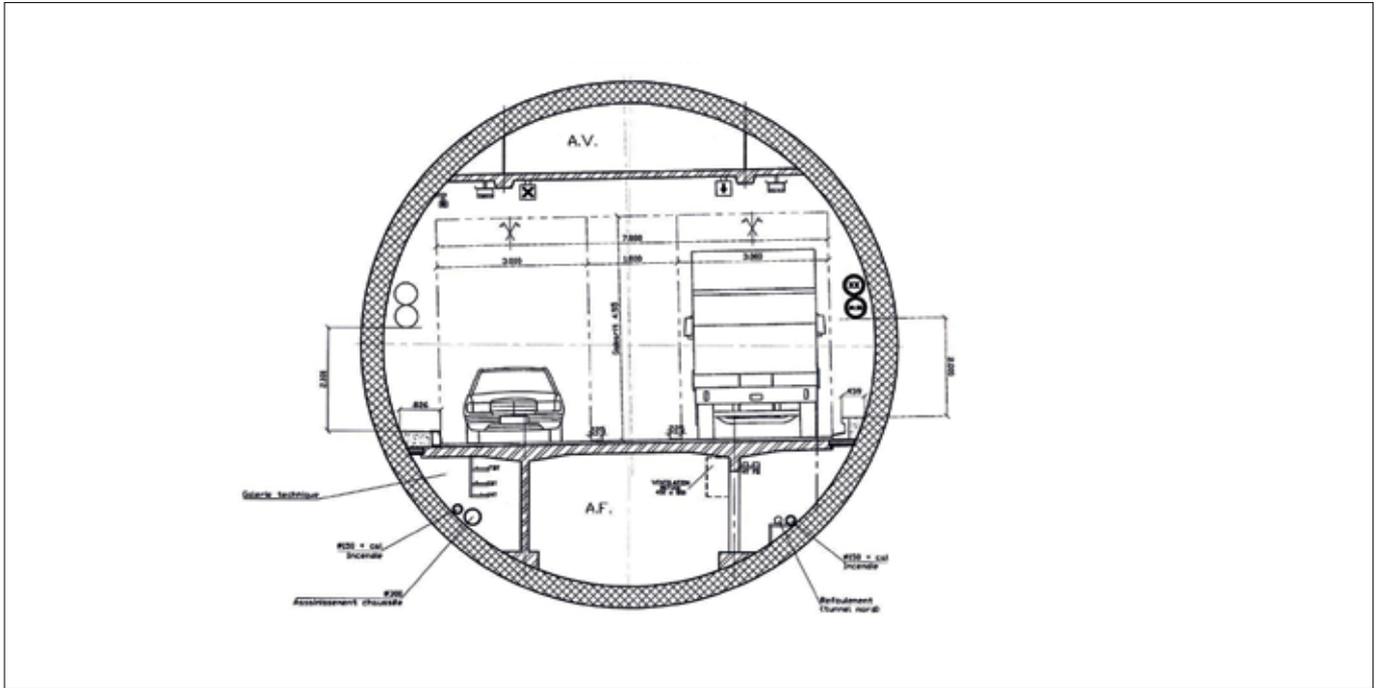


Figure 6 : voûte circulaire creusée au tunnelier (Caluire, 1999)

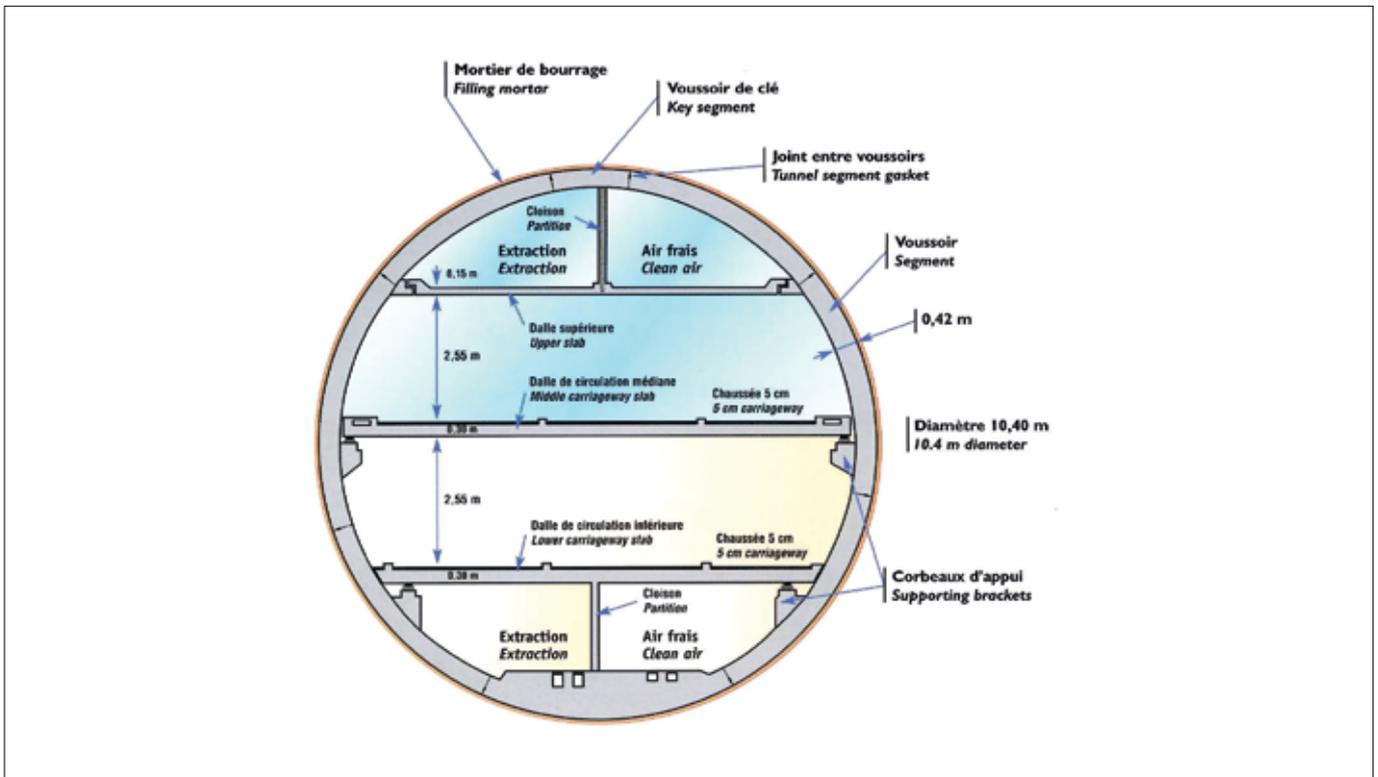


Figure 7 : tunnel à chaussées superposées (A86 ouest, 2009-2011)

10.5.1 Spécificité des revêtements de tunnel

La plupart des revêtements de tunnel « supportent » :

- leur propre poids,
- des actions résultant d'une interaction entre revêtement et terrain (suivant la qualité du contact mutuel),
- l'effet de la pression hydrostatique de l'eau souterraine à l'extrados,
- des sollicitations thermiques et de retrait gêné (bétons), des charges d'exploitation (souvent faibles : équipements, vibrations...),
- des charges accidentelles.

Les voûtes de tunnels fonctionnent très bien, pour autant que leur calage au terrain encaissant soit effectif. Dans ce cas, les efforts normaux passent par la partie centrale de l'épaisseur du revêtement et maintiennent l'ouvrage en compression.

Cette condition idéale peut ne pas être remplie en tout point du revêtement, ce qui occasionne alors des désordres. Il faut alors distinguer les tunnels en fonction de leur revêtement.

Tunnels anciens en maçonnerie

Malgré l'absence de soutènement préalable de l'excavation, les maçonneries ont montré depuis longtemps leur capacité d'adaptation aux variations des charges. Elles constituent à elles seules le soutènement définitif. La présence des joints de mortier leur confère une souplesse qui autorise des déformations parfois importantes permettant une redistribution des efforts dans le revêtement. L'ensemble du revêtement, au départ monolithique, se fractionne en panneaux s'articulant autour de « rotules ». C'est au niveau de celles-ci que l'on découvre des désordres spécifiques (écaillage de moellons, ouverture de joints d'assise).

L'espace entre l'extrados du revêtement et le rocher, théoriquement rempli avec du blocage de pierres liées de mortier ou de pierres sèches, montre très souvent des vides francs (en calotte) ou un fort pourcentage de vides dans le blocage. Ces défauts de butée mal répartie sont un facteur aggravant dans la tenue d'une maçonnerie.

Tunnels modernes en béton coffré non armé

Il n'existe, normalement, quasiment plus de vides à l'extrados du revêtement ; de plus, celui-ci est au contact du soutènement de l'excavation qui joue déjà son rôle de confinement du terrain. Les appuis sont donc (par construction) mieux répartis à l'interface entre soutènement (adhérent au massif) et revêtement coulé que pour un revêtement en maçonnerie.

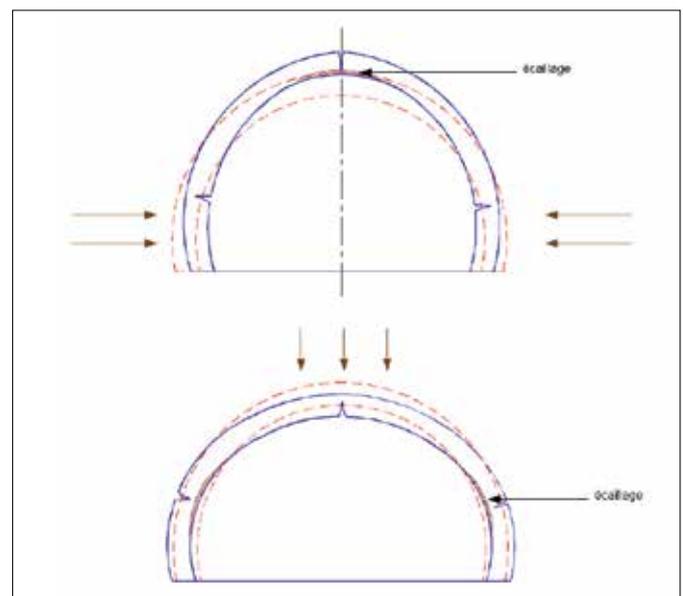
Cependant, dans le cas de sollicitations importantes de la part du terrain, le revêtement en béton, qui est beaucoup plus rigide qu'une maçonnerie, peut se rompre brutalement. Dans tous les cas, ces désordres présentent des signes avant-coureurs, parfois discrets, qu'il faut savoir détecter.

10.5.2 Les situations génératrices de désordres

La « fatigue » de l'encaissant, les convergences du terrain engendrent des contraintes et des déformations dans l'ouvrage. Du fait de l'absence de confinement « parfait » dans les ouvrages anciens et donc en raison d'une répartition non homogène des contraintes, leur revêtement est souvent soumis à des chargements ponctuels.

En revanche, en ce qui concerne les ouvrages récents, la répartition des contraintes liées à l'action du terrain est plus homogène mais le revêtement est moins tolérant à ces déformations.

Un désordre apparaît si le seuil des déformations admissibles du matériau, ou son seuil des contraintes admissibles, est dépassé. Les deux schémas théoriques suivants illustrent la position des désordres spécifiques suivant la déformation du profil.



Figures 1a et 1b : déformations-types du revêtement sous les contraintes du terrain encaissant
(en pointillé : profil théorique, en trait plein : profil déformé)

Les zones en compression qui apparaissent à l'intrados se manifestent par de l'écaillage mécanique. Les zones en extension vont se manifester par des joints ouverts ou des fissures. Dans la réalité, la déformation d'une voûte est rarement aussi symétrique. Les deux types de déformation interviennent souvent ensemble et de façon asymétrique ; les désordres cités peuvent se découvrir alors en tout point du profil.

10.5.3 Les mesures

L'examen et la qualification des désordres du revêtement doivent être complétés par :

- des mesures de convergences relatives : les dimensions du profil en travers de la section affectée sont mesurées périodiquement afin de renseigner sur la valeur et la vitesse des déformations relatives (qui peut atteindre un à plusieurs mm/an pour les tunnels anciens) ;
- des mesures de contrainte (au vérin plat ou par surcarottage) permettent de connaître les valeurs des contraintes de compression régnant en différents points du revêtement ;
- des mesures et des contrôles de l'épaisseur effective du revêtement (par carottage ou par forage avec endoscopie).

10.6.1 Analyse des eaux

L'eau est un des principaux facteurs de désordres. En cas de venues d'eau dans l'ouvrage, on commence par rechercher les sources extérieures possibles : nappe, pluie, ruissellements et infiltrations superficielles, fuites de réseaux enterrés... et voir si des actions sont envisageables auprès des concessionnaires.

Si l'inspecteur peut évaluer le débit instantané le jour de sa visite, il convient de réaliser des mesures de débits régulièrement sur une certaine durée. Leurs variations peuvent orienter vers une origine possible de la source, par exemple si la pluviométrie est également mesurée ou récupérée auprès des services météorologiques.

Une analyse physico-chimique permet de déterminer la provenance de l'eau. Cette analyse est également indispensable pour évaluer les éventuelles actions néfastes de l'eau sur l'ouvrage ou ses équipements : attaques chimiques des bétons et mortiers, corrosion des armatures, colmatage des dispositifs de drainage...

L'inspecteur peut déjà lui-même, à l'aide d'appareils simples, mesurer certains paramètres comme les débits, la température, le potentiel hydrogène (pH), la conductivité qui donnent une première idée sur l'origine possible ou probable de l'eau.

Parallèlement, on peut faire pratiquer des prélèvements et quelques analyses d'eau par un laboratoire spécialisé. Ces analyses doivent permettre d'évaluer le caractère « agressif » ou « incrustant » de l'eau. Elles comprennent la détermination :

- du pH (si possible sur site),
- du titre alcalimétrique complet (TAC) ; exprimé en degré français (°f), il est utilisé pour mesurer le taux d'hydroxydes, de carbonates et de bicarbonates d'une eau,
- de la teneur en calcium (Ca^{++}),
- des sels dissous (extrait sec à 105 °C),
- de l'agressivité de l'eau : mesurée par l'index de Langelier-Hoover ou par l'index de Riznar, elle indique la capacité de l'eau à dissoudre (caractère « dissolvant ») ou à déposer du carbonate de calcium (caractère « incrustant »).

Si l'on suspecte une attaque chimique particulière, les analyses doivent être complétées par des mesures sur :

- les chlorures (Cl^-) ;
- les sulfures (S^-) ;
- les sulfates (SO_4^-) ;
- le magnésium (Mg^{++}) ;
- les matières en suspension (MES – quantité et nature) ;
- l'ammonium (NH_4^+) ;
- l'oxydabilité au permanganate en milieu alcalin (présence

de matières organiques).

La recherche des origines de l'eau est facilitée par :

- un bilan ionique total ;
- la DBO5 (demande biologique en oxygène sur 5 jours) qui représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique d'un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours ;
- la DCO (demande chimique en oxygène) qui est la consommation en oxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau ; elle permet d'évaluer la charge polluante ;
- la teneur en azote total (K).

L'interprétation globale des résultats peut s'avérer complexe. On peut donner quelques repères, sous forme de seuils d'alerte qui peuvent orienter sur des investigations plus complexes.

L'eau est potentiellement agressive si :

- le PH est inférieur à 6,5 ;
- la teneur en CO_2 est de l'ordre de 15 à 30 mg/l ;
- l'index Langelier est négatif ;
- l'index de Riznar est supérieur à 7 (corrosive voire très corrosive si $\text{IR} > 8,5$) ;
- la teneur en SO_4^- est supérieure à 200 mg/l ;
- la teneur en Mg^{++} est supérieure à 300 mg/l ;
- la teneur en NH_4^+ est supérieure à 15 mg/l ;
- le TAC est inférieur ou égal à 5°f ;
- la teneur en Cl^- est supérieure à 250 mg/l.

L'eau est potentiellement incrustante si :

- l'index Langelier est positif ;
- l'index de Riznar est inférieur à 6 (très incrustante si $\text{IR} < 5$).

La présence de matières organiques est avérée si :

- la DCO est supérieure à 10 mg/l ;
- la DBO5 est supérieure à 6 mg/l ;
- l'oxydabilité au permanganate en milieu alcalin est supérieure à 4 mg/l.

10.6.2 Analyse de la composition des mortiers et bétons

On peut parvenir à retrouver une composition originelle de mortier ou béton, en particulier la nature du liant (chaux ou ciment) en faisant réaliser les mesures ou les essais énumérés ci-après :

- densité ;
- porosité ;
- teneur en eau ;
- analyse chimique centésimale sur la fraction soluble dans l'acide nitrique (HNO_3) ;
- analyse thermique différentielle et thermogravimétrie simultanée ;
- détermination des espèces minérales présentes par diffractométrie des rayons X ;
- examen par microscopie électronique à balayage.

Certains de ces essais nécessitent un matériel de haute technicité. Ils permettent également la mise en évidence des produits chimiques réactifs (réaction sulfatique ou alcali-réaction). Il sont coûteux et leur interprétation est complexe.

10.6.3 Essais sur les bétons

En laboratoire, les essais sur les bétons sont le plus souvent exécutés sur des carottes de sondages, moyennant certaines précautions. On peut citer :

- la mesure de la profondeur de carbonatation (test à la phénolphthaléine),
- le profil de concentration en chlorures,
- la mesure de la résistance en compression.

Sur site, on mesure principalement la dureté superficielle (sclérométrie) à titre indicatif et comparatif.

10.6.4 Autres tests in situ

L'emploi d'acide chlorhydrique (HCl) permet, par humectage du matériau, de différencier la dolomie du calcaire (celui-ci fait effervescence, à la différence de la dolomie), mais aussi de lever rapidement une indétermination sur la nature de certaines concrétions.

ANNEXE 7 : TECHNIQUES D'INVESTIGATION ET ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

La liste des techniques citées ci-après n'est pas exhaustive. Elle reflète ce qui est couramment utilisé en tunnel. Certaines d'entre elles sont destructives et ne s'appliquent pas à tous les ouvrages ; les mesures dimensionnelles effectuées périodiquement permettent de mettre en évidence les vitesses de déformation ou de déplacement et donc une éventuelle accélération dangereuse. Leur utilisation répond à trois types d'objectifs :

- suivre l'évolution d'un ouvrage dans le temps (1)
- compléter une inspection détaillée afin d'établir le diagnostic final (2)
- réaliser des reconnaissances complémentaires dans le cadre d'un projet de réfection (3).

L'intitulé des techniques et des essais précise, par les numéros qui lui sont associés, les objectifs pour lesquels ils sont employés.

10.7.1 Fissurométrie (1)

Cette technique est employée sur une ou quelques fissures isolées dont on pense que le comportement est représentatif d'une évolution locale. Elle est employée dans les maçonneries et les bétons, très rarement sur des fissures rocheuses (du moins en tunnel).

Les jauges extensométriques en plastique (à coller à cheval sur la fissure) ont une durée de vie limitée et ne mesurent que l'ouverture de la fissure.

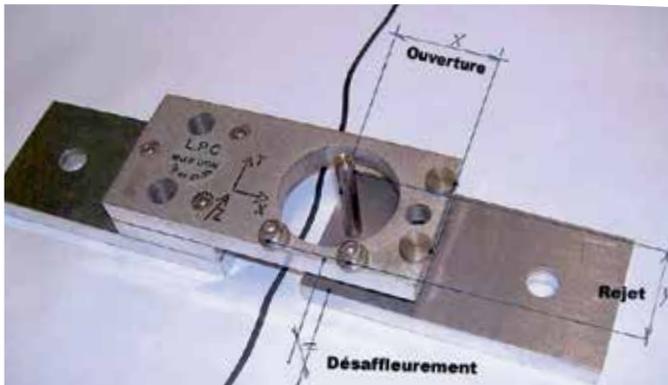


Figure 1 : fissuromètre tridimensionnel (XYZ) à sceller

Les appareils métalliques à sceller permettent de réaliser des mesures tridimensionnelles (en X, Y et Z) sur de longues périodes et sont plus fiables. Les mesures sont manuelles (pied à coulisse) ou automatiques (centrale d'acquisition avec ou sans télé-transmission) et toujours associées à des mesures de température.

Les fissuromètres à corde vibrante ou à capteur électrique ont une grande précision (1/100 de mm) et sont reliés à une centrale d'acquisition.

10.7.2 Mesures de convergences (1, 2, 3)

Les mesures de convergences consistent à déterminer les variations de distance entre des repères scellés dans les parements sur une section de l'ouvrage. Pour connaître le déplacement de l'ensemble du profil dans l'espace, un nivellement et une planimétrie du tunnel doivent être associés aux mesures de convergence. On mesure également la température pour pouvoir interpréter les résultats.

Convergences relatives (1, 2)

On parle plus précisément de convergences relatives car, dans la plupart des cas, les mesures ne font pas appel à des points fixes extérieurs à l'ouvrage, d'où le caractère relatif des déplacements mis en évidence.

• Distance-mètres à fil invar (type LRPC)

La chaîne de mesure est constituée de fils en invar (alliage d'environ 64 % de fer et 36 % de nickel – auxquels sont ajoutés du chrome, du manganèse et du carbone – et dont le coefficient de dilatation est pratiquement nul et parfois négatif) étalonnés et d'un vernier au 1/20^{ème} de millimètre. Le nombre de repères installés dans chaque profil de mesure varie de 2 à 7. On en déduit le type et la vitesse de déformation du profil.

La méthode nécessite une absence totale de circulation. La durée de vie des repères (qui doivent être protégés) est de plusieurs décennies, sauf en cas de choc.

Les mesures sont manuelles. La précision est de l'ordre de 0,2 mm, suffisante pour un suivi de déformations sur une base longue.

- **Distance-mètres opto-électroniques**

L'absence de fils tendus permet de tolérer une circulation faible. Comme pour les distance-mètres à fil invar, le nombre de repères installés dans chaque profil de mesure varie de 2 à 7 et les mesures réalisées permettent les mêmes analyses.

La durée de vie des repères (qui doivent être protégés) est de plusieurs décennies, sauf en cas de choc.

Leur précision est légèrement moins grande que celle des distance-mètres à fil mais de nos jours généralement suffisante.

Convergences absolues (2, 3)

- **Extensométrie en forage**

On mesure le déplacement du parement par rapport à un point supposé stable en fond de forage (barre invar scellée). La précision peut être inférieure au 1/10^{ème} de millimètre.

La méthode est relativement lourde (forages carottés, scellements délicats, coût). Elle est peu utilisée en surveillance.

- **Distance-mètres à fil invar ou opto-électroniques associés à des mesures topographiques**

Les mesures topographiques permettent de se rattacher à un point stable extérieur au tunnel permettant de déduire le mouvement du profil dans l'espace.

Leur précision est généralement liée à celle des mesures topographiques.

10.7.3 Nivellement (1, 2, 3)

Couplé avec les convergences relatives au fil invar, le nivellement fournit les déplacements du profil. Au-delà d'une certaine longueur d'ouvrage, la précision des visées chute très vite si l'on ne dispose que de points de repère stables extérieurs au tunnel. Elle est de ce fait très peu utilisée.

Nivellement relatif (1, 2, 3)

Il fournit les déplacements du profil et peut être couplé avec les convergences relatives au fil invar. Un cheminement englobant tous les repères (de piédroits par exemple) et s'appuyant sur un repère supposé stable donne une précision de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm pour un cheminement de 1 km.

Nivellement général (1, 2, 3)

Venant en complément du précédent, ce nivellement de précision permet de suivre les variations d'altitude du repère d'origine sur lequel s'appuient les nivellements relatifs. Il se rattache à des points stables extérieurs au tunnel (repères

IGN, par exemple) et peut nécessiter des cheminements assez longs (double cheminement avec contrôle de marche).

10.7.4 Mesures de déformation du revêtement par extensométrie (1)

Les extensomètres à base courte fixés à la surface du revêtement, ou incorporés dans celui-ci avant bétonnage, permettent de mesurer ses déformations, c'est-à-dire les allongements ou raccourcissements relatifs du matériau à partir d'un état initial. Les deux types de matériel sont les extensomètres à cordes vibrantes et les jauges électriques dont la résistance varie avec leur déformation.

Pour des orientations du dispositif selon l'un des axes principaux de déformation, et dans l'hypothèse d'un comportement élastique, on peut passer aux contraintes grâce au module d'élasticité du béton, mesuré sur des carottes extraites du revêtement.

10.7.5 Profilométrie par station ou en continu (1, 2, 3)

Le relevé de profils de souterrains est effectué à l'aide d'un profilomètre laser, constitué d'un tachéomètre électronique fonctionnant sans réflecteur, monté sur un axe de rotation que l'on place parallèlement à l'axe du tunnel. Le pas de mesure est choisi en fonction du profil relevé et de la finesse recherchée. Il permet d'avoir un profil géométriquement quantifié en tout point de l'ouvrage.

Pour chaque point de mesure, l'appareil enregistre les coordonnées polaires du point mesuré par rapport à l'axe du profilomètre. Il n'y a aucune obligation d'être à proximité de l'axe du tunnel, puisque la portée du profilomètre s'étend de 0,30 m à 50 m. Le positionnement précis du profilomètre en coordonnées planes s'effectue à l'aide d'un théodolite. Le pas de mesure est choisi en fonction du profil relevé et de la finesse recherchée. La précision de la mesure est de ± 10 mm à ± 5 mm. Avec des précautions particulières, on est arrivé à une précision de $\pm 3,5$ mm lors des travaux du tunnel sous la Manche.

Une centaine de points par profil est généralement suffisante. Cette méthode, qui est utilisée systématiquement pour le contrôle de l'excavation des tunnels en cours de creusement, permet également de vérifier la géométrie des ouvrages avant et pendant des travaux de réparation.

En revanche, elle n'est pas adaptée à la surveillance de l'évolution des déformations des tunnels en exploitation pour les raisons suivantes :

- la précision de la mesure en elle-même est insuffisante pour mettre en évidence les déformations habituellement très faibles des tunnels en service ;
- le recalage précis sur un profil déjà réalisé pour une nouvelle mesure est une opération délicate.

Pour une profilométrie par station, la distance entre profils mesurés varie de 2 à 10 m, suivant l'irrégularité des objets et la précision recherchée.

Actuellement, la profilométrie en continu est devenue quasi systématique pour un projet de réparation. Il s'agit souvent d'une modélisation en trois dimensions par mesure laser (ou lasergrammétrie). Elle repose sur l'utilisation de scanners laser qui permettent de lever plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes. On obtient ainsi un nuage de points relevés tous les 3 à 5 cm sur l'intrados du tunnel et aux abords des têtes. Ces mesures laser peuvent être couplées à des prises de vues photogrammétriques numériques.

Les technologies les plus répandues sont la triangulation (émission d'un point laser et enregistrement de son image dans un capteur), la mesure du temps de vol (émission d'une impulsion laser et enregistrement du temps aller-retour) et la mesure par différence de phase (émission d'un rayon modulé en fréquence par une onde harmonique). Selon les méthodes, les appareils offrent des portées variant de quelques mètres à plus d'un kilomètre, des précisions allant du dixième de millimètre à quelques centimètres et des vitesses d'acquisition allant de 500 à plus de 100 000 points à la seconde.

Les avantages essentiels qu'offre cette méthode sont la rapidité d'intervention et la possibilité d'effectuer des mesures longue portée sur des zones d'accès difficile.

L'inconvénient majeur de la technologie est que les capteurs enregistrent absolument tout ce qui se trouve dans leur champ, y compris les objets qui n'ont pas forcément d'intérêt pour l'exploitation des résultats : véhicules ou personnel passant à proximité, poussière, équipements provisoires. Il faut procéder au filtrage des points mesurés, ce qui s'avère fastidieux quand l'ouvrage est particulièrement « bruyé » ou quand sa dimension exige de nombreuses stations d'acquisition. De ce fait, il est fortement recommandé de ne pas intervenir sous circulation.

10.7.6 Radar géophysique (2, 3)

La réflectométrie d'impulsion d'ondes électromagnétiques, plus connue sous le nom de « radar géophysique », utilise des ondes de très grande fréquence (antennes de 200 à 1500 MHz). Lors du déplacement régulier des antennes émettrice et réceptrice le long des profils de mesure (en général des génératrices du tunnel), les réflexions des ondes sur les différentes discontinuités rencontrées constituent autant d'échos sur les radargrammes. Cette méthode permet en particulier de mettre en évidence le contact entre l'extrados du revêtement et le terrain s'il n'y a pas collage entre les deux. Vides et objets métalliques (cintres, armatures) sont décelés.

Il s'agit d'une méthode à grand rendement qui permet une profondeur d'investigation importante (supérieure à 30 cm – la profondeur d'investigation varie en fonction de la fréquence des ondes émises).

Son interprétation est difficile et demande à être étalonnée à l'aide de sondages. La présence d'eau perturbe les mesures.

Son coût est relativement élevé, d'autant plus que cette méthode d'investigation ne peut pas se substituer aux méthodes traditionnelles.

10.7.7 Scanner par laser continu en lumière visible (1, 2, 3)

Cette technique permet d'acquérir une imagerie à l'aide d'un scanner rotatif embarqué sur un véhicule spécialisé. Celui-ci se déplace sur l'axe de l'ouvrage à une vitesse variant entre 1,5 et 3 km/h pendant que le scanner en rotation balaye l'intrados à grande vitesse dans un plan transversal. Certains scanners peuvent faire l'acquisition sur 360° (chaussée comprise). Les données brutes d'acquisition font l'objet d'un traitement informatique qui permet de fournir une image en haute définition (maximum 10 000 pixels par ligne).

Le scanner permet d'obtenir l'image d'un intrados dans sa globalité et de faire apparaître des zones qui seraient passées inaperçues car fondées sur des différences ténues qui ne font jamais l'objet d'un relevé systématique quand il n'y a aucun désordre associé. De plus, l'imagerie scanner permet à un gestionnaire d'avoir une représentation de l'aspect réel de son tunnel, ce que les relevés manuels et les photographies classiques permettent seulement en partie.

Ces images constituent une aide très précieuse pour la visualisation objective d'un intrados. Elles sont d'un grand intérêt, en particulier pour les tunnels longs et anciens dont les intrados complexes et mal restitués par les relevés manuels,

sont difficiles à appréhender globalement. Ainsi, si des images sont acquises périodiquement, il devient alors possible d'estimer des évolutions de manière beaucoup plus précise.

L'image scanner peut se révéler d'une grande utilité dans le cas de tunnels présentant des problèmes (présélection de zones, avant-métrés, repérages d'appareils, ...). En cas de contentieux avec une entreprise, l'image, par son objectivité photographique, constitue un document opposable, contrairement à un levé manuel toujours contestable s'il n'a pas été contradictoire.

L'imagerie ne remplace pas une inspection sur site. Certains désordres graves sont invisibles à l'image, soit par définition (zones sonnantes creux, exfoliations débutantes), soit parce qu'ils sont noyés dans la multitude des anomalies qui apparaissent. L'image ne met pas en évidence, parmi la multitude d'objets visibles, ceux qui sont représentatifs d'un désordre avéré, probable ou prévisible et demande un travail d'analyse important de la part de l'inspecteur. Enfin, le coût reste encore très élevé pour des ouvrages courts (moins de 1 000 m) compte-tenu des frais de mise à disposition des matériels d'acquisition des données sur le terrain.

Il peut être opportun, pour répartir ces frais, de prévoir les levés de plusieurs tunnels successifs sur un itinéraire, lorsque cela est possible.

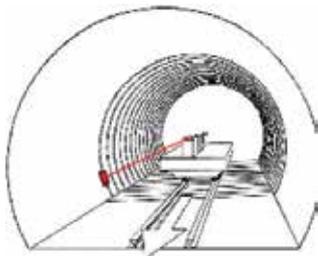
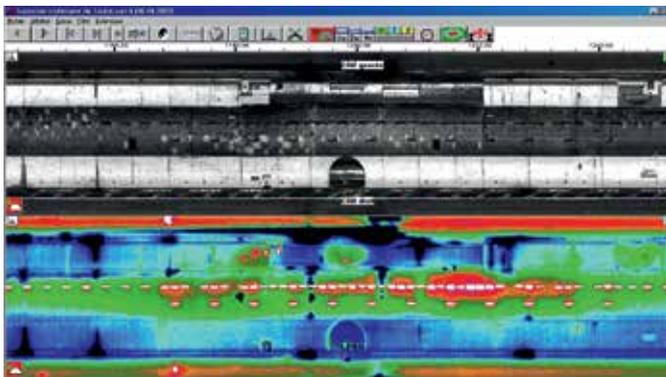


Figure 2a : principe de rotation hélicoïdale sur 360°



Figures 2b et 2c : imagerie scanner en lumière visible et thermographie d'une même portion de tunnel

10.7.8 Scanner par laser continu en thermographie (1, 2, 3)

La voie infrarouge est un système passif ou actif. En thermographie passive, le scanner enregistre le rayonnement thermique émis naturellement par la paroi du tunnel ; en thermographie active, le scanner mesure le rayonnement thermique de la paroi avec apport d'une perturbation thermique. Cette méthode permet de détecter des circulations d'eau (ou d'air) situées dans le revêtement ou à son extrados et, par exemple, de mettre en évidence des drains masqués par un enduit, à condition qu'il existe un contraste thermique suffisant entre la structure et le fluide.

10.7.9 Analyses de mortiers et bétons (2, 3)

Elles sont décrites en **annexe 6**.

10.7.10 Analyses d'eau (2, 3)

Elles sont décrites en **annexe 6**.

10.7.11 Mesures de pression (2, 3)

Pression de contact avec le terrain

Les cellules de pression totale (à cordes vibrantes ou à contre-pression), placées entre le terrain et le revêtement, permettent de suivre les évolutions des interactions ouvrage-terrain pendant la construction et les premières années d'exploitation.

Pression hydrostatique

La mesure de la pression hydrostatique depuis le tunnel s'effectue dans un forage dans lequel est placée une cellule de mesure de pression interstitielle, hydraulique, pneumatique, ou électrique (corde vibrante).

10.7.12 Sondages destructifs ou carottés (2, 3)

Sauf exceptions, ils ne doivent être utilisés que dans les tunnels dépourvus d'étanchéité en extrados.

Les sondages destructifs courts (moins de 3 m) sont généralement suffisants pour reconnaître le corps du revêtement, ainsi que le terrain proche. L'intérêt des sondages destructifs est leur faible coût. Ils doivent être valorisés par l'enregistrement des paramètres liés à la progression de l'outil (au minimum : vitesse d'avancement, poussée sur l'outil et percussion réfléchie) et par une observation endoscopique.

Les sondages carottés permettent de prélever des échantillons intacts, tant dans le revêtement que dans le terrain encaissant, en vue d'essais de laboratoire (essais de résistance et de déformabilité, caractérisation physico-chimique ou minéralogique). Les carottes retirées du terrain doivent faire l'objet de relevés descriptifs de la fracturation (par exemple, la détermination du RQD (rock quality designation) qui est le rapport de la somme des longueurs des éléments de carotte supérieurs à 10 cm sur la longueur totale carottée) et de photographies en couleur.

10.7.13 Fenêtres (2, 3)

Elles sont pratiquées, surtout en ouvrages anciens en maçonnerie de moellons ou de briques, dans le revêtement jusqu'au contact du terrain, pour autant qu'il n'y ait aucune étanchéité en extrados. Cette méthode est plus difficile à mettre en œuvre dans le cas de revêtement en béton coffré et est fortement déconseillée lorsque l'ouvrage dispose d'un système d'étanchéité totale, en intrados ou en extrados.

L'ouverture de fenêtres dans le revêtement permet l'observation directe d'une partie importante du revêtement, de son contact avec le terrain, et d'une partie du terrain. Elles permettent, en outre, de pouvoir prélever des échantillons de grande taille.

Des précautions doivent être prises pour garantir la stabilité du revêtement et le maintien en exploitation du tunnel. Dans certains cas, il peut être nécessaire de conforter préalablement la voûte à l'aide de cintres. Pour cette raison, on limite les dimensions des fenêtres à 0,6 x 0,6 m en voûte. En piédroit, leur hauteur peut être augmentée.

Les fenêtres doivent faire l'objet d'un relevé schématique de toutes leurs faces et de photographies.

Elles sont de moins en moins employées, particulièrement en raison de leur coût élevé (main d'œuvre).

10.7.14 Tranchées (2, 3)

Elles permettent de reconnaître la nature et la profondeur d'une assise de piédroits, la constitution ou les désordres d'une partie de chaussée.

10.7.15 Essais mécaniques sur échantillons (2, 3)

Ils sont généralement réalisés sur des carottes prélevées dans le revêtement ou le terrain encaissant. Toute la gamme des essais mécaniques de laboratoire peut être mise en œuvre.

10.7.16 Mesures de contraintes (2, 3)

Les mesures de contraintes in situ peuvent porter, soit sur le revêtement, soit sur le terrain (nu ou dans une fenêtre). Il existe deux grandes familles de méthodes.

Méthode par substitution (vérin plat)

Utilisée pour les mesures à la surface de l'intrados ou à faible profondeur dans le revêtement, cette méthode consiste à substituer à la contrainte de compression que l'on désire mesurer, une contrainte extérieure connue.

Méthode par relâchement local des contraintes en fond de forage (surcarottage)

Elle permet d'accéder à la mesure de l'état de contrainte à l'intérieur du massif. Le principe repose sur la mesure des déformations induites dans la roche par un relâchement local des contraintes obtenues par surcarottage.

10.7.17 Autres reconnaissances

Les types de reconnaissances suivants ne sont employés que dans des cas très particuliers pour répondre à des questions spécifiques :

- micro-gravimétrie (2, 3)
- panneaux électriques (2, 3)
- microsismique (2, 3)
- mesure de radioactivité (2, 3)
- ultrasons (2, 3)
- dilatométrie (2, 3)
- impédance mécanique (2, 3)
- essais de perméabilité (2, 3).

10.8 ANNEXE 8 : PRINCIPE DE TRONÇONNAGE

Nota : cette annexe reprend l'annexe 4 du Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements »

Tunnels anciens (ou sans archives)

On établit le document synoptique à l'aide de toute la connaissance rassemblée.

10.8.1 Tubes

Un tunnel est composé d'un ou de plusieurs tubes contenant une ou plusieurs voies de circulation. Un tube comporte deux extrémités appelées têtes. Par convention, une tête a une longueur minimale d'un mètre.

Un tunnel peut aussi comporter des galeries inter-tubes, des galeries d'évacuation et des galeries de sécurité ; celles-ci sont considérées comme des tubes et peuvent être également tronçonnées.

10.8.2 Tronçons

Un tronçon est une section homogène de tube en terme de types de structures et de contextes géologiques. Il est défini par deux points métriques (PM) localisant son début et sa fin.

Définis à la construction, les tronçons ne varient pas dans le temps sauf cas exceptionnel, comme une réparation lourde, par exemple.

10.8.3 Élaboration du document synoptique

L'élaboration du document synoptique est à la charge du maître d'ouvrage constructeur, pour les tunnels neufs, ou à celle du maître d'ouvrage gestionnaire, pour les ouvrages anciens. Ce synoptique est ensuite fourni par le service organisationnel du maître d'ouvrage gestionnaire avant chaque inspection. Un exemple de document synoptique est fourni ci-après.

Tunnels neufs (ou récents)

Le découpage de l'ouvrage en tronçons doit être élaboré par le service ayant assuré la maîtrise d'ouvrage de la construction. Il doit faire partie du dossier des interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

Tous les tronçons sont repérés en fonction des PM définitifs de l'ouvrage qui sont reportés sur le synoptique. Il est nécessaire que des recalages précis soient faits à partir des divers PM de chantier utilisés. Afin de pouvoir par la suite établir des corrélations éventuelles entre désordres et structures, les limites exactes des tronçons doivent s'appuyer sur les données du suivi de chantier.

10.8.4 Tronçonnage – Exemple

Tronçons		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14										
PM des tronçons		-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284			
Zone d'influence		1																				1			
Structure																									
GENIE CIVIL	Calotte	1				2				1				2				1							
	Piédroit droit	1								2								1							
	Piédroit gauche	1								2				1				2				1			
	Extrados tête à l'air libre	1		sans objet																					
	Radier	sans objet																							
	Equipements génie civil																								
	Chaussée	sans objet																							
	Drainage	NE																							
	Assainissement	sans objet																							
	Corniche sur tête	1		sans objet																					
Cotation « Génie civil »		1				2				1				2				1							

Tronçons		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14										
PM des tronçons		-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284			
Structure																									
EAU	Voûte	1								2				1											
	Piédroit droit	1								2								1							
	Piédroit gauche	1								2				1				2							
	Chaussée	sans objet																							
	Cotation « Eau »		1				2				1				2				1						

Figure 1 : exemple de tronçonnage d'un tube

Nota : cette annexe reprend l'annexe 3 du Fascicule 40 « Tunnels – Génie civil et équipements »

10.9.1 But du marquage

Quelles que soient les actions de surveillance ou d'exploitation, il est nécessaire de localiser avec précision les constatations et les interventions effectuées. Un repérage doit donc être matérialisé par des plaques fixées sur le parement de l'intrados. On parle de « points métriques » ou PM.

Le marquage sert aussi au relevé d'intrados (calotte, traverse et piédroits) effectué depuis le sol ou une nacelle.

Un espacement de 10 m (marquage décamétrique) doit être adopté. En effet, il est impossible de se repérer rapidement avec un marquage trop espacé.

Dans les tunnels récents, dont le revêtement est constitué d'anneaux consécutifs en béton, on peut réaliser un marquage par plots. Il est néanmoins recommandé d'adopter le marquage décamétrique.

Dans le cas de deux tubes parallèles, chacun d'entre eux aura son propre marquage, mais le sens de ces marquages sera le même. Lorsqu'il y a des gaines de ventilation, chaque gaine doit être marquée de la même façon. Les points métriques des gaines doivent coïncider avec ceux du tube principal.

Dans un souci d'homogénéité avec l'itinéraire, il est de règle d'adopter pour les PM le même sens que les PR de l'itinéraire.

10.9.2 Origine du marquage

Les entrées en tunnel sont parfois complexes (casquettes, têtes architecturales, ...) et la véritable entrée en souterrain n'est plus toujours visible. Aussi, il convient d'adopter comme PM0 le premier profil en travers fermé.

Pour les besoins de la surveillance, la position réelle des fronts d'entrée en souterrain peut toujours être recalculée à l'aide des archives de construction, et reportée en marges des levés. À cette occasion, il est important d'être prudent et d'éviter tout risque de confusion entre le marquage employé pendant le chantier de creusement et le marquage mis en place pour l'exploitation.

10.9.3 Pérennité du marquage

Indispensable à la surveillance de l'ouvrage, le marquage doit être :

- **Conservé durant toute la vie de l'ouvrage**

Les inspections détaillées relèvent de très nombreuses indications s'appuyant sur le marquage existant. Dans le cas où le marquage existant n'est pas homogène avec l'itinéraire, ou a une origine peu logique, on le conserve néanmoins dans le souci de pérennité de suivi. Il ne doit pas être modifié.

- **Précis**

La méthode la plus précise consiste à placer les PM calculés à partir de l'axe du tube réalisé (et non du projet) sur l'un des parements.

Pour des tunnels courts, un ruban (le plus long possible) est déroulé à la base d'un piédroit, permettant de matérialiser l'emplacement des valeurs décamétriques. Cette méthode demande un soin maximum, car les erreurs de calage peuvent rapidement se cumuler jusqu'à atteindre 2 à 3% de la longueur totale. Pour les tunnels longs (plus de 100 m), l'implantation du marquage nécessite l'intervention d'un géomètre.

L'emploi des odomètres est déconseillé, leur usure entraînant de fortes erreurs cumulées. Il en est de même des topofil.

- **Fixé à l'abri des accrochages par les véhicules et du vandalisme**

Une hauteur minimale de 2 m est recommandée pour éviter tout risque de vandalisme.

- **Lisible de loin (8 à 10 m de distance), aussi bien du sol que sur une plateforme en élévation**

Les chiffres ont une hauteur de 8 à 10 cm.

- **Régulièrement entretenu (remplacement des plaques) :**

Un nettoyage périodique est nécessaire. Si les plaques doivent être fixées sur des éléments remplaçables (tôles parapluie, bardages...), on veille à les récupérer pour leur repose précise.

10.9.4 Nature des plaques

Les plaques en aluminium embouti de type « minéralogique » sont adaptées aux supports irréguliers comme les maçonneries. Sensibles à la corrosion dans certains tunnels, elles deviennent progressivement difficiles à lire.



Figure 1 : marque décimétrique (plaque minéralogique)

Les plaques plastiques gravées ou sérigraphiées conviennent pour les parements lisses, comme ceux en béton coffré. Elles sont cependant fragiles aux chocs et supportent mal les déformations.



Figure 2 : marque décimétrique (plaque sérigraphiée)

Dans les deux cas, il faut prohiber les plaques rétro-réfléchissantes incompatibles avec les méthodes de relevé en continu (scanner...).

10.9.5 Fixation des plaques

Il existe différents moyens de fixation :

- par spit : suivant le support, la tenue est aléatoire et la durée de vie assez courte ;
- par cheville et vis mécanique : c'est le meilleur système, il s'adapte à tous les supports ; sur des tôles, on utilisera des vis parker ; l'emploi d'inox est impératif ;
- par scellement au ciment prompt : ce moyen est à éviter (décollements rapides) ;
- par collage à la résine (ou colles spéciales).

ANNEXE 10 : CADRE DE COMPTE-RENDU DE CONTRÔLE ANNUEL

CONSTAT DE CONTRÔLE ANNUEL	Année :
-----------------------------------	----------------

Tunnel :	Longueur :
Tube :	N° Ouvrage :
Voie :	
P.R. :	Centre d'exploitation :

Actions de surveillance réalisées dans l'année		
	Date	Intervenants
Inspection détaillée périodique		
Inspection détaillée exceptionnelle		
Examen sommaire		
Mesures		
Visite spécifique		
Autres		

Synthèse et bilan des anomalies constatées ou signalées (d'après relevé permanent d'événements)			
Date	PM	Description	Mesures prises

Actions entreprises (sécurité, entretien)		
Intervenants	Date	Nature

Examens sommaires des têtes et abords
<i>Évolutions notées sur les points à surveiller (PS) des rapports d'IDP</i>
<i>Faits nouveaux</i>

Visite de la couverture
<i>Conformité des charges appliquées (si la couverture est faible)</i>
<i>Faits nouveaux</i>

Examens sommaires des autres parties d'ouvrage
<i>Évolutions notées sur les points à surveiller (PS) des rapports d'IDP</i>
<i>Faits nouveaux</i>

Actions à prévoir
<i>Par exemple : demande d'avis, de visite, d'inspection, d'entretien spécialisé,</i>

Le chef du service opérationnel (date)	Le chef du service organisationnel (date)
(signature)	(signature)

L'adoption d'une codification générale est indispensable pour les raisons suivantes :

- Le levé d'intrados d'une voûte est établi au cours de la première inspection détaillée ; il doit ensuite être tenu à jour avec le plus grand soin, grâce au report des constatations faites à l'occasion des différentes inspections ou visites et grâce à l'indication des travaux effectués précisément repérés. Ces mises à jour doivent pouvoir être faites par des techniciens autres que ceux qui ont effectué le levé initial mais sur des bases absolument identiques.
- Le levé doit pouvoir être interprété sans ambiguïté par toute personne appelée à le consulter en vue d'une intervention, quelle qu'en soit la nature.
- Le levé doit faire apparaître de façon claire les zones d'ouvrage dans lesquelles peut être engagée la sécurité des usagers ou des structures.
- La définition et l'application d'une politique cohérente pour la surveillance et l'entretien d'un ensemble de tunnels sera facilitée par l'emploi de levés entièrement comparables.

10.11.1 Le report des observations

La méthode utilisée consiste à reporter les observations sur un plan développé de la voûte supposée vue de dessus et « écrasée » sur un plan horizontal, afin d'obtenir une « cartographie » de l'intrados (figures 25). Ce type de représentation est appelé « levé d'intrados ».

Dans le cas d'un tunnel revêtu, ce levé doit faire apparaître :

- les grandes lignes de la structure du revêtement (joints, limites particulières, numéros de plots, niches...),
- les désordres constatés, l'état apparent ou décelé du revêtement,
- l'interprétation de cet état (si possible).

Dans le cas de tunnels (ou de tronçons) non revêtus, le levé s'apparente à un levé géologique qui doit faire apparaître :

- les grandes lignes visibles de la structure du massif, susceptibles de générer des volumes instables,
- les volumes instables déclarés et potentiels.

Certaines formes de structures, de revêtements, de désordres peuvent être codifiées à l'aide de figurés (hachures, symboles, à-plats colorés). Quelques exemples sont donnés ci-après.

10.11.2 La forme des levés d'intrados

Sur le terrain, les observations sont reportées sur papier millimétré (ou carroyé en centimètres) permettant un levé rapide et suffisamment précis. À cette fin, le marquage décimétrique préalable de l'ouvrage est essentiel pour localiser précisément les objets. Les fonds de plan en papier peuvent être remplacés, sur le terrain, par une tablette graphique informatique.

Quel que soit le moyen retenu, la précision et la qualité du levé sont indépendants du système et ne dépendent que de l'inspecteur. Pour faciliter le levé détaillé sur le terrain, il est préférable de conserver la même échelle de représentation dans le sens transversal et le sens longitudinal.

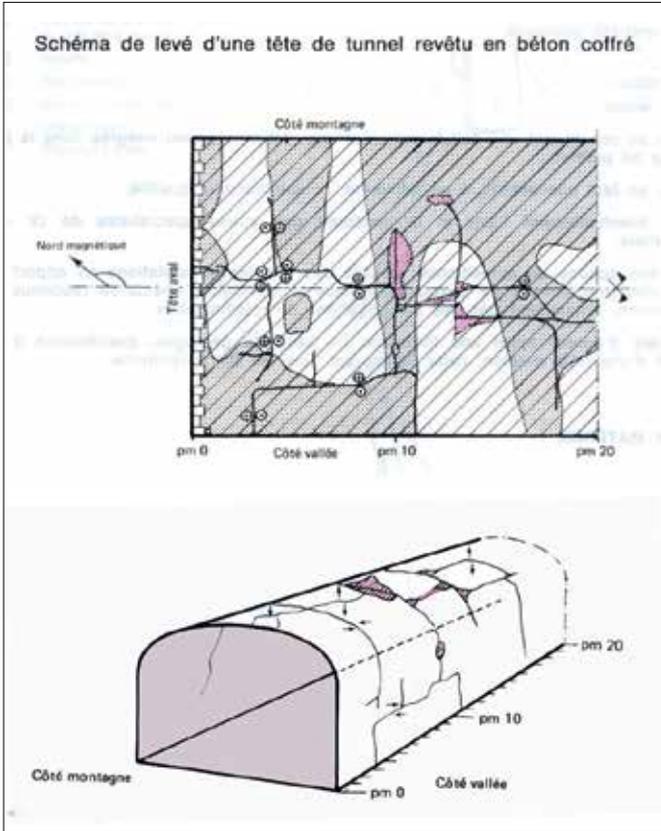
Le levé d'intrados, à remettre avec le rapport d'inspection, se présente sous la forme d'une bande rectiligne pourvue d'une échelle des PM et dont la largeur est égale à la développée de l'ouvrage. Dans le cas de courbures accentuées du tracé en plan, et si la compréhension l'exige, une représentation particulière peut être adoptée.

L'échelle optimale s'avère être le 1/100^{ème}, dans les deux dimensions du plan. Pour de grandes développées, et afin que le levé reste facilement maniable, une échelle au 1/200^{ème} peut être localement utilisée.

10.11.3 Conventions, symboles et figures utilisés dans les levés d'intrados

Ils doivent être utilisés avec souplesse. Dans le cas d'intrados complexes et dégradés, il est important de privilégier la lisibilité des désordres (superficie, répartition, risque induit), plutôt que celle du terrain ou des revêtements.

Schémas représentatifs et explicatifs



Figures 1a et 1b : ancien levé de développée et vue en perspective d'un tronçon de tunnel revêtu en béton coffré non armé



Figure 2c : levé de développée récent (avec l'application RADIS) par saisie informatisée du même tunnel [ce tunnel a bénéficié de travaux entre les deux levés de désordres]

Les conventions des représentations géologiques

Une partie de la symbolique géologique est devenue un standard de fait (conventions de notation des pendages, de caractérisation des fissures, de joints) dans la représentation sur les levés d'intrados.

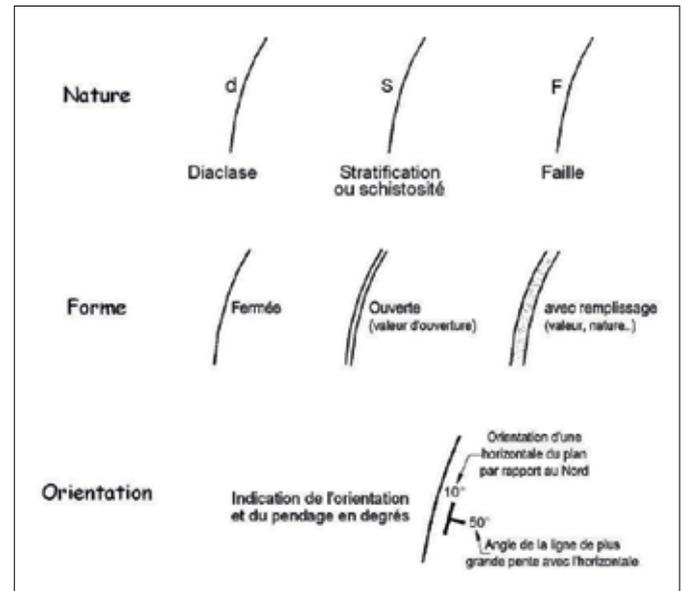


Figure 3a : schémas explicatifs des discontinuités

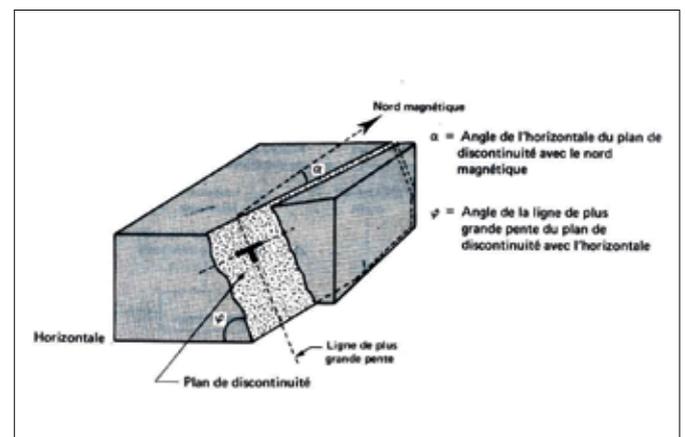


Figure 3b : schéma explicatif du symbole de pendage (orientation)

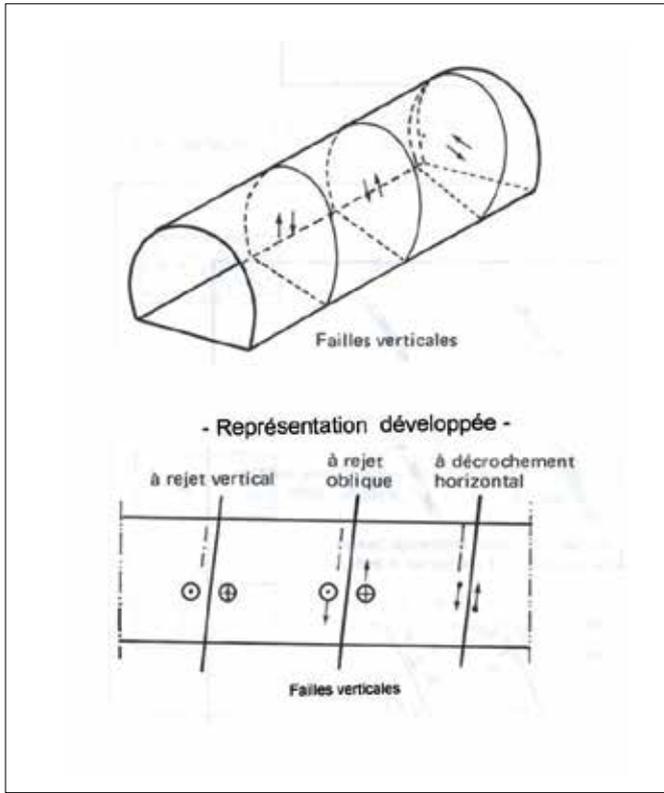


Figure 3c : représentations des failles et de leurs rejets

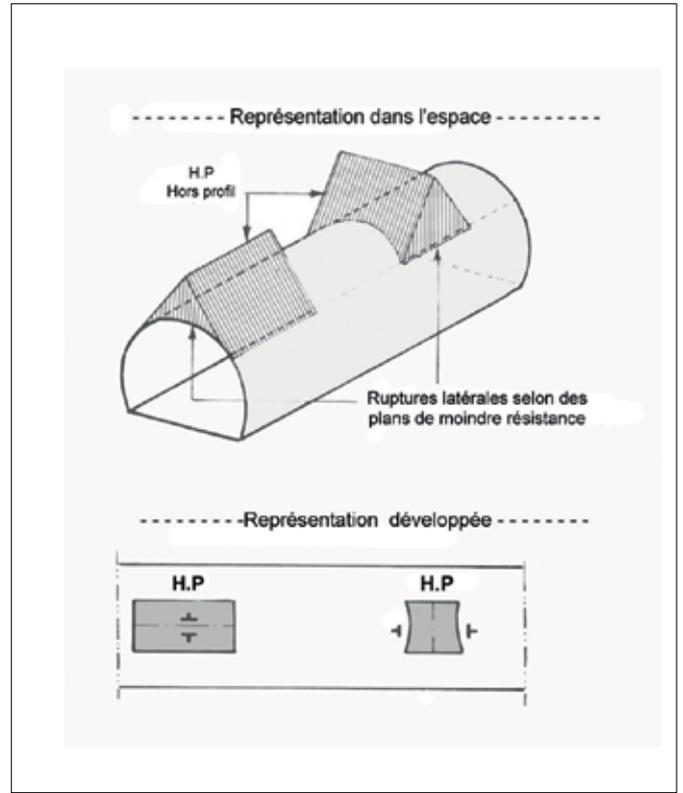


Figure 3e : représentations des hors profils dans les tunnels non revêtus

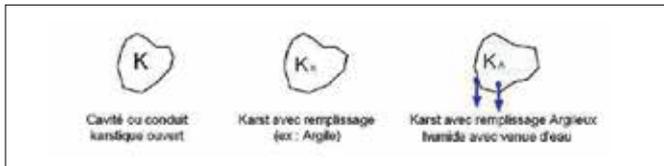


Figure 3d : schémas explicatifs des karsts

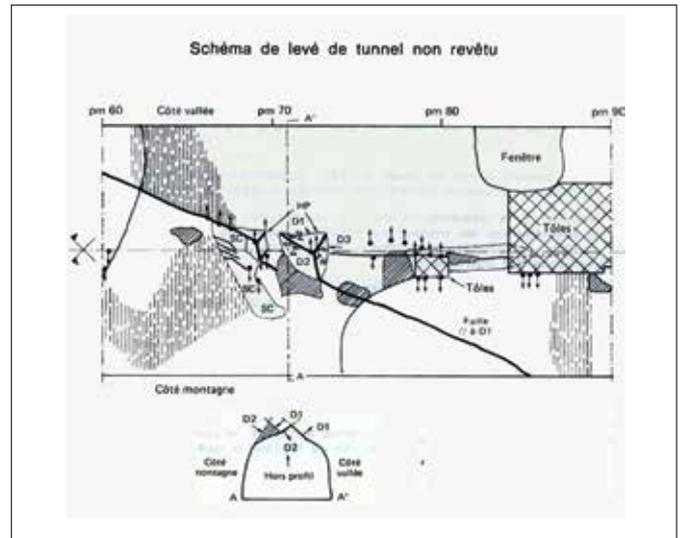


Figure 3f : exemple de représentation d'un tronçon de tunnel non revêtu

Les conventions des revêtements et de quelques équipements

Les exemples de figurés et de symboles donnés ci-après constituent des règles de représentation communément adoptées par le CETU et la SNCF ainsi que tous les utilisateurs du logiciel de représentation des désordres RADIS commercialisé par la Martinière Plus et la SNCF.



Figure 4a : figurés relatifs à la nature du revêtement



Figure 4b : symboles d'équipements divers

Les figurés et symboles des désordres

Si une grande liberté est laissée quant à leur nombre et à leur définition, adaptés aux désordres spécifiques des tunnels, leur application doit être strictement observée (homogénéité des levés). L'emploi de couleurs peut permettre de simplifier les figurés tout en améliorant la lisibilité du document.

• Fissuration

La fissuration est un défaut ou un désordre courant dans les structures qu'il est important de bien décrire. Les deux figures suivantes illustrent les déplacements relatifs possibles des deux lèvres d'une fissure, ainsi que les termes et figurés employés pour la qualifier. Les valeurs de ces déplacements (l'ouverture est la plus couramment notée) sont à mesurer et à noter chaque fois que cela est possible.

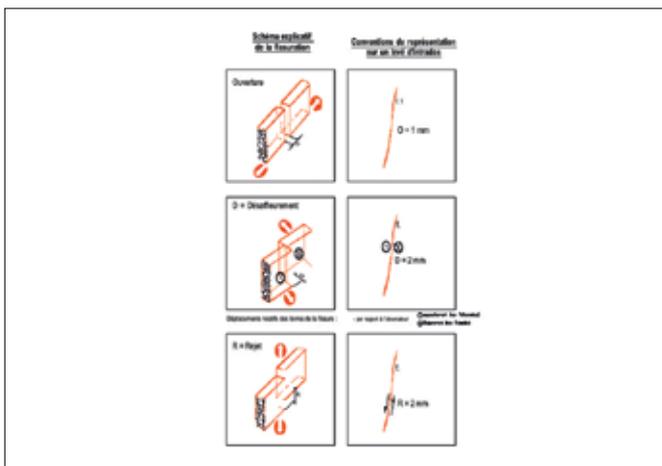


Figure 5a : cinématique et représentation de la fissuration

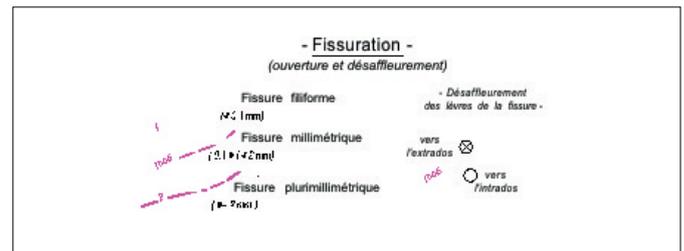


Figure 5b : représentation de la fissuration (application RADIS)

• Désordres sur les revêtements



Figure 6a : figurés des désordres spécifiques aux maçonneries de pierres

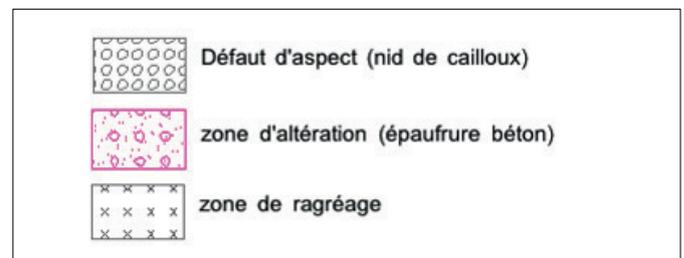


Figure 6b : figurés des désordres spécifiques aux bétons

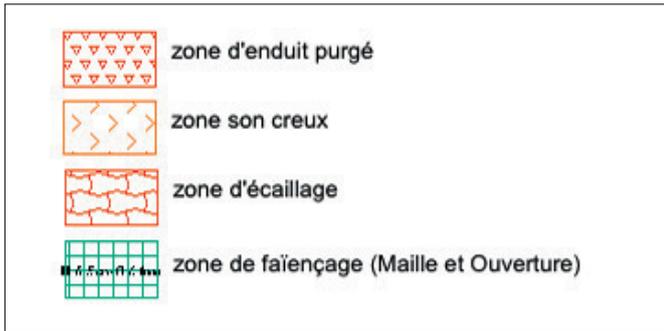


Figure 6c : figurés des désordres communs à tous les revêtements

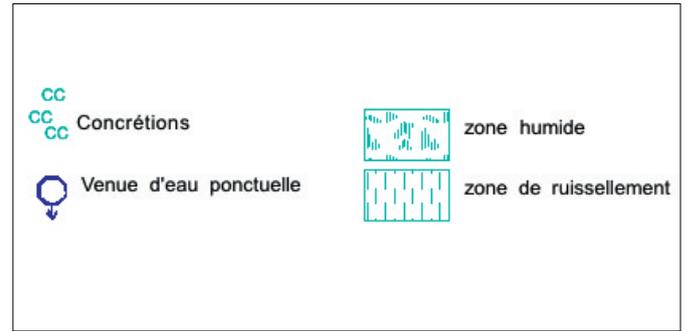


Figure 7 : figurés des désordres spécifiques aux venues d'eau

Ce cadre s'applique aux inspections détaillées périodiques. Pour les autres types d'inspection (initiale ou exceptionnelle), le service organisationnel et l'organisme prestataire peuvent, en fonction du but recherché et des constatations effectuées, adapter le présent modèle.

Dans tous les cas, le rapport doit faire apparaître :

- le nom du service demandeur,
- les noms, qualités, niveaux de spécialité et signatures du ou des inspecteurs et du responsable de l'organisme prestataire.

1 - RESUME

Principales constatations

Principales préconisations en matière d'entretien, de surveillance et de travaux de réparations (le cas échéant).

2 - IDENTIFICATION

Service décisionnel :

Service organisationnel :

Service opérationnel :

Centre d'exploitation et d'intervention :

Nom de l'ouvrage :

Tube :

Voie concernée (*type de voie, numéro de voie*) :

PR de la tête origine :

Département :

Commune :

Identifiant de l'ouvrage :

Aménagements de surface et maître d'ouvrage :

Voies latérales et maître d'ouvrage :

Voies portées ou franchies et maître d'ouvrage :

***Avertissement** : les quatre paragraphes suivants constituent un résumé des données que l'on peut trouver de façon exhaustive dans la fiche signalétique du dossier d'ouvrage. Ce résumé est destiné à faciliter la compréhension du rapport d'ID à un lecteur qui ne disposerait pas de l'accès au document signalétique. Il gagne à être établi une première fois puis mis à jour régulièrement.*

3 – CARACTERISTIQUES GENERALES

Résumé des principales caractéristiques de chaque tube (*nombre de tubes, longueur et largeur roulable de chaque tube, distance entre piédroits...*)

Structure de l'ouvrage (*fausse tête, tranchée couverte, revêtement, soutènement...*), définie par tube, le cas échéant

Géométrie (*voûte, cadre...*) définie par tube et tronçon, le cas échéant

Modes de creusement

Drainage et étanchéité

Assainissement

Plate-forme et chaussée

Aménagements remarquables

Ouvrages annexes (*souterrains et extérieurs*)

Dispositifs de surveillance installés (*nature, localisation*)

Réseaux transitant dans l'ouvrage (*électricité, télécommunication, eau potable, assainissement...*)

Ouvrages proches (*nature, distance, maître d'ouvrage, régime administratif*)

Grosses réparations ou améliorations

4 – CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

Environnement géologique et hydrogéologique (*nature générale du terrain encaissant, coupes éventuelles, extraits de DS25 (développée de voûte synthétique sur 25 mètres établie lors du creusement...)*).

Rappel des accidents géologiques particuliers qui ont nécessité une adaptation du marché initial, ou qui ont provoqué des difficultés au cours de la réalisation.

Rappel des zones instrumentées, résultats.

5 – CONCEPTION & EXECUTION

Maîtrise d'ouvrage études et travaux :

Maîtrise d'œuvre études et travaux :

Entreprise ou groupement titulaire du marché de construction et entreprises sous-traitantes :

Dates de construction (*début et fin des travaux*) :

Date de mise en service :

6 – VIE DE L'OUVRAGE

Documents de référence (*dates des précédentes inspections détaillées et références des dossiers, date de la dernière évaluation IQOA et référence du dossier, bref résumé des conclusions des inspections ou visites antérieures*)

Travaux d'entretien et de réparations réalisés depuis la dernière ID (*entretien courant, entretien spécialisé, réparations, bilan des travaux*)

Problèmes mis en évidence par la surveillance continue

Travaux d'aménagement réalisés (*dates et nature des grosses réparations ou améliorations*)

Investigations ou surveillances spécifiques mises en œuvre (*mesures, résultats et analyses*)

Régime de surveillance adopté (*surveillance renforcée ou haute surveillance*)

Mesures de sécurité particulières

7 – TRONCONNAGE

Définition des tronçons homogènes repérés en PM

8 – CONDITIONS D'EXECUTION DE L'INSPECTION DETAILLEE

Motif et particularités de l'inspection

Dates, durée

Moyens mis en œuvre (*matériel, véhicule spécifique, restrictions de circulation, fermeture complète, personnel de sécurité...*)

Définition précise des parties d'ouvrage concernées (ou non) par l'ID

Conditions météorologiques

9 – CONSTATS

Constatations concernant les accès, l'environnement immédiat des têtes, la couverture (*désordres des ouvrages de tête liés au vieillissement ou à des actions extérieures, modifications de l'environnement proche préjudiciables à la sécurité des usagers ou à la pérennité de certaines structures du tunnel, risques présents dans l'emprise du tunnel préjudiciables aux riverains*).

Les désordres et autres faits marquants relevés lors de l'inspection peuvent être illustrés dans le corps du rapport, en parallèle aux constatations.

Constatations concernant l'intrados du tunnel (*description et analyse des désordres reconnus et notés sur les levés d'intrados (Annexe A)*) :

- Maçonneries :

- description de l'appareillage, de l'état des moellons, des mortiers,
- description des venues d'eau,
- état des réparations anciennes,
- déformations, ventres, fissuration, zones sonnante creux ;

- Bétons :

- description de l'aspect général,
- description des joints,
- description de la fissuration (retrait, rupture...), zones sonnante creux, venues d'eau, désordres divers ;

- Non revêtu :

- localisation et description précise des masses instables ou potentiellement instables (nature, volume) ;

- Venues d'eau.

Constatations concernant les dispositifs de drainage, d'étanchéité et d'assainissement (*description, désordres, état d'engorgement*) ;

Constatations concernant les chaussées et les accotements (*description, désordres*) ;

Constatations concernant les ouvrages ou aménagements annexes.

Remarque 1 : Suivant la configuration du tunnel, on raisonnera par zone ou par nature de désordre.

Remarque 2 : On adoptera la même démarche pour tous les ouvrages annexes qui entrent dans le cadre de l'ID (*galeries, gaines, abris ou niches techniques, puits...*).

Remarque 3 : Parmi toutes ces constatations, doivent être sélectionnées celles qui constituent des points à surveiller (PS) lors des contrôles annuels, et qui doivent être signalées par ailleurs sur les levés. Elles doivent faire l'objet, dans la mesure du possible, d'une illustration photographique.

10 – INVESTIGATIONS, MESURES, ESSAIS

Exploitation des investigations complémentaires, des essais et des mesures (raison, nature, description et analyse des résultats) effectués depuis la dernière inspection.

Prescriptions de nouvelles investigations, le cas échéant.

11 – NOTE DE SYNTHÈSE

Conclusions de l'ID :

- Évolutions par rapport aux inspections précédentes
- Synthèse et interprétation des mesures, investigations, essais

Suites à donner :

- Propositions de mesures de sécurité si nécessaire, de modification du régime de surveillance (modification de périodicité, mise en surveillance renforcée...)
- Rappel des investigations complémentaires préconisées
- Prescriptions concernant l'entretien courant et spécialisé
- Propositions concernant les réparations à prévoir (degré d'urgence, type d'action)
- Préconisations pour les contrôles annuels – Liste des points à surveiller (PS)
- Propositions de mise en place ou de modification du régime de surveillance (modification de périodicité, mise en surveillance renforcée, haute surveillance...)

Les points menaçant la sécurité immédiate des usagers (et/ou des structures) sont clairement définis et repérés. Le chef du service opérationnel doit en être averti dès leur constatation (ou dès que possible après l'inspection sur site) par un courrier électronique ou par une télécopie.

12 – PROPOSITION D'UNE COTATION IQOA

Rappel des classes de cotations

Génie civil :

- Cotation de l'état du génie civil par sous-parties et synthèse par parties,
- Décomposition en zones,
- Synthèse des notes.

Présence de l'eau :

- Cotation par sous-parties et synthèse par parties,
- Décomposition en zones,
- Synthèse des notes.

13 – ANNEXES

Annexe A : Dossier des levés d'intrados (un relevé par tube inspecté)

Annexe B : Dossier des planches

- Détails de structure concernés par des désordres (extraits du dossier d'ouvrage, ou plans créés à ce sujet),
- Graphes, histogrammes, dessins éclairant le constat.

Annexes supplémentaires (suivant besoin : essais. mesures. courbes de sondages...).

10.13.1 Etape 1 : Etablissement du tronçonnage – Exemple

Points métriques	-10	-5,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	284
géométrie	profil voûté																
structure	tête	tunnel creusé														tête	
géologie	calcaire micritique				calcaire gris beige bioclastique						calcaire oolithique		marnes				
soutènement	sans	P3	P2	P3	P2	P1	P3	P2	P1	P3	sans						
étanchement	feuille PVC																
revêtement	Béton Armé	béton non armé														béton armé	
Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			

Figure 1 : exemple de tronçonnage d'un tube

10.13.2 Étape 2 : Partition des tronçons – Exemple

Tronçons		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14							
GENIE CIVIL	PM des tronçons	-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284
	Zone d'influence																					
	Structure																					
	Calotte																					
	Piédroit droit																					
	Piédroit gauche																					
	Extrados tête à l'air libre																					
	Radier																					
	Equipements génie civil																					
	Chaussée																					
	Drainage																					
	Assainissement																					
	Corniche sur tête																					
	EAU	Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14						
PM des tronçons		-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284
Structure																						
Voûte																						
Chaussée																						

Figure 2 : exemple de partition des tronçons d'un tube

10.13.3 Étape 3 : Inspection détaillée (voir chapitre 6)

10.13.4 Étape 4 (facultative) : Synthèse des désordres – Exemple

Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14							
PM des tronçons	-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284
Zone d'influence			Baron projeté décollé																		
Structure																					
Calotte		Fer apparent																			Nid de callosité
Piédroit droit																					Fissures transversales
Piédroit gauche																					Fissures transversales
Extrados tête à l'air libre																					Fissures transversales
Radier																					sans objet
Equipements génie civil																					sans objet
Chaussée																					sans objet
Drainage																					Réseau engorgé
Assainissement																					sans objet
Corniche sur tête																					sans objet

Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14								
PM des tronçons	-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284	
Structure																						
Voûte																						Goutte-à-goutte
Piédroit droit																						Goutte-à-goutte
Piédroit gauche																						Goutte-à-goutte

Figure 3 : exemple de synthèse des désordres dans un tube

10.13.5 Étape 5 : Cotation des sous-parties et des parties – Première et seconde agrégation des notes IQOA

Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14										
PM des tronçons	-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284			
Zone d'influence		1																				1		
Structure																								
Calotte				1						2			1									2	1	
Piédroit droit								1														2	1	
Piédroit gauche					1																	2	1	
Extrados tête à l'air libre		1																					1	
Radier																							sans objet	
Equipements génie civil																							sans objet	
Chaussée																							sans objet	
Drainage																							1	
Assainissement																							sans objet	
Corniche sur tête		1																					sans objet	
Cotation « Génie civil »				1																			2	1

Tronçons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14											
PM des tronçons	-10	-6,5	-5,5	-4,5	-2	26,2	55	66,2	74	85	122,5	130	135	154	196,5	200	230	237	278,5	280,5	284				
Structure																									
Voûte					1																		2	1	
Piédroit droit																							1		
Piédroit gauche					1																		2	1	
Chaussée																								sans objet	
Cotation « Eau »					1																			2	1

Figure 4 : exemple de cotation IQOA-Tunnels « Génie civil » et « Eau »

10.13.6 Étape 6 : Synthèse des notes IQOA

Cotation Génie Civil				
PM début	PM fin	Long	Note	S
-10	122,5	132,5	1	
122,5	135	12,5	2	
135	230	95	1	
230	237	7	2	
237	284	47	1	

Cotation Eau				
PM début	PM fin	Long	Note	S
-10	130	140	1	
130	135	5	2	
135	284	149	1	

Tube	Cotation Génie Civil							Cotation Eau				
	1	2	2E	3	3U	NE	S	1	2	3	NE	S
Tube nord (m)	274,5	19,5	0	0	0	0	0	289	5	0	0	0
Tube nord (%)	93%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	98%	2%	0%	0%	0%

Tube	Cotation Génie Civil							Cotation Eau				
	1	2	2E	3	3U	NE	S	1	2	3	NE	S
Tube nord (m)	274,5	19,5	0	0	0	0	0	289	5	0	0	0
Tube nord (%)	93%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	98%	2%	0%	0%	0%
Tube sud (m)	276	15	0	0	0	0	0	291	0	0	0	0
Tube sud (%)	95%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
Tubes nord et sud (m)	550,5	34,5	0	0	0	0	0	580	5	0	0	0
Tubes nord et sud (%)	94%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	99%	1%	0%	0%	0%

Figure 5 : exemple d'agrégation des cotations IQOA-Tunnels

ANNEXE 14 : NATURE ET COTATION DES DÉSORDRES – ZONE D'INFLUENCE

Défauts observables	Origines possibles	Classe d'état
Stabilité d'ensemble		
Fissuration ou fracturation du terrain en tête	- Nature du matériau du massif encaissant - Mouvement d'ensemble du massif	1 à 3U
Effondrement local	- Nature du matériau du massif encaissant - Conséquences de phénomènes climatiques	2 à 3
Bourrelets de terrain	- Mouvement général, révélateur d'un glissement d'ensemble du massif	2E ou 3U
Déformations (en forme de vagues) du terrain du massif		
Érosions en surface, ravinements		1 à 2E
Inclinaisons anormales d'arbres ou poteaux	- Mouvement général, révélateur d'un glissement d'ensemble du massif	1 à 3U
Modifications de l'environnement		
Présence de surcharges non prévues		1 à 2E
Accumulations de matériaux		1 à 2
Constructions récentes dans la zone d'influence		Non coté
Présence de végétation nuisible		1 à 2E
Défauts des réseaux des concessionnaires en tête d'ouvrage		Non coté

ANNEXE 15 : NATURE ET COTATION DES DÉSORDRES – ÉQUIPEMENTS DE GÉNIE CIVIL

Défauts observables	Origines possibles	Classe d'état
Dalle et cloison de ventilation		
Défaut d'alignement général ou localisé, en plan ou en élévation	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise exécution - Chocs - Actions physico-chimiques du milieu environnant 	1 à 2E
Altération des matériaux constitutifs		
Dysfonctionnement des suspentes		
Défauts des joints entre éléments		
Défauts des appareils d'appui		
Fissures		
Chaussée		
Fissures longitudinales et transversales	<ul style="list-style-type: none"> - Fatigue couche de roulement - Mauvaise réalisation de joints de reprise 	1 ou 2
Faïençage	<ul style="list-style-type: none"> - Fatigue excessive de la couche de roulement - Mauvais comportement des matériaux de chaussée 	1 ou 2
Nids de poule	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise qualité à la fabrication - défaut d'adhérence 	1 ou 2
Défauts de surface (flache, pelade, orniérage, bourrelet, remontée d'eau)	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais comportement des matériaux de chaussée - Mauvaise exécution 	1 ou 2
Affaissement	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation du terrain support - Fluage de la chaussée - Tassement différentiel 	2E
Trottoir et bordure		
Défauts des bordures - défaut d'alignement général ou localisé - absence d'un ou de plusieurs éléments - altération des éléments (déjointoiement, épaufrure, effritement)	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise exécution - Chocs - Actions physico-chimiques du milieu environnant 	1 ou 2
Défauts de surface des trottoirs - dégradation du revêtement - déformation de surface - présence de végétation	<ul style="list-style-type: none"> - Stagnation des eaux de ruissellement - Mauvais comportement des matériaux constitutifs - Insuffisance d'entretien 	1 ou 2
Affaissement du corps du trottoir	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture des dalles - Mauvaise exécution - Mauvais comportement du matériau - Circulation de véhicules - Infiltrations d'eau 	1 ou 2

Défauts observables	Origines possibles	Classe d'état
Dispositifs de retenue – Dispositifs de fixation des équipement d'exploitation et de sécurité		
Défaut d'alignement général ou localisé, en plan ou en élévation	- Mauvaise exécution - Chocs - Actions physico-chimiques du milieu environnant	1 ou 2
Altération des matériaux constitutifs		
Altération de la peinture ou de la galvanisation		
Altération des fixations		
Corniches et éléments architecturaux		
Défaut d'alignement général ou localisé, en plan ou en élévation	- Mauvaise exécution - Chocs - Actions physico-chimiques du milieu environnant	2
Altération des matériaux constitutifs		
Altération des fixations		
Défauts des joints entre éléments préfabriqués		
Dispositifs d'évacuation des eaux		
Colmatage	- Défaut de maintenance	1 à 2E
Stagnation d'eau	- Absence d'un dispositif d'évacuation des eaux - Mauvaise conception des dispositifs - Défaut de réalisation - Dégradation des dispositifs par usure, accidents ou vandalisme	1 à 2E
Ruissellement sur l'intrados	- Dysfonctionnement du dispositif d'évacuation des eaux - Défaut d'étanchéité	2 ou 2E
Dégradations	- Usure, vandalisme, défaut de maintenance ou accident	1 à 2E
Étanchéité et joints		
Cheminement d'eau de ruissellement		2 ou 2E
Suintements		
Coulure, percolation, résurgences		

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

