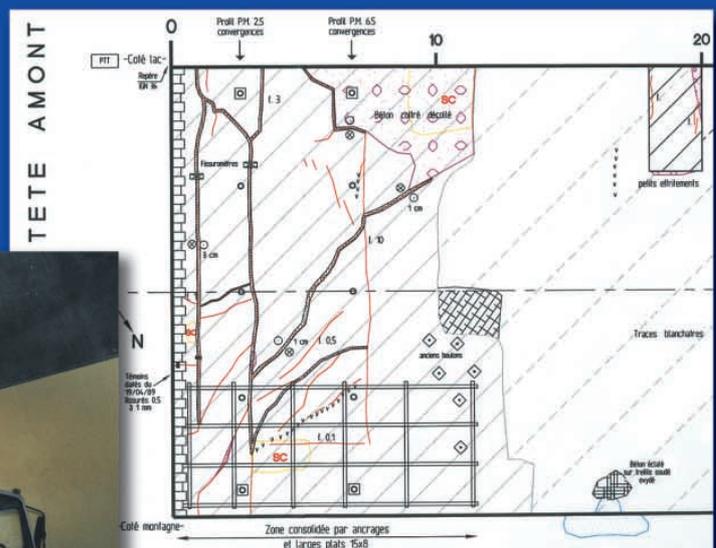


Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers

Du désordre vers le diagnostic



Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers

Du désordre vers le diagnostic

Le présent guide est destiné en premier lieu aux personnes chargées de réaliser les inspections détaillées du génie civil des tunnels creusés. Il s'adresse également aux autres intervenants qui à des degrés divers participent à l'organisation et à l'exploitation des actions de surveillance (gestionnaires, responsables de cellules départementales d'ouvrages d'art, responsables de la gestion de la route).

Les tunnels creusés se distinguent des autres ouvrages d'art (y compris les tranchées couvertes) par l'implication beaucoup plus grande du terrain encaissant, qu'il soit visible (c'est le cas des tunnels non revêtus) ou qu'il soit masqué par un revêtement. Il est par conséquent logique que les considérations liées au terrain encaissant occupent une large part dans ce document.

Ce guide est élaboré et publié par le CETU dont l'une des missions depuis 1974 est l'inspection des tunnels routiers du réseau national. Il illustre la très grande variété des tunnels routiers français : variété dans la nature des terrains traversés, les types de revêtements, l'âge et l'état de conservation de l'ouvrage.

Le patrimoine visité par le CETU comporte également des tunnels sur voies navigables, quelques tunnels ferroviaires et plusieurs galeries techniques. En revanche, il ne comporte pas encore de tunnel creusé au tunnelier et revêtu de voussoirs ; par conséquent, ce dernier type d'ouvrage n'est pas évoqué dans ce guide.

Les nombreux dossiers archivés renferment des données d'une exceptionnelle richesse par la diversité des désordres qui y sont décrits et photographiés. Ils ont permis d'alimenter le document par de multiples cas concrets. Le CETU bénéficie ainsi d'une expérience accumulée durant les trente dernières années que ce guide permet de mieux partager.

	Introduction générale	5	1
Chapitre 1	Présentation du catalogue des désordres	7	
1.1.	Introduction	7	
1.2.	Terminologie	8	
1.2.1.	Définitions officielles	8	
1.2.2.	Définitions générales proposées	8	
1.2.3.	Termes liés au débit des venues d'eau	9	
1.2.4.	Termes liés aux manifestations de l'eau	10	
1.2.5.	Description de la fissuration	10	
1.3.	Liste des désordres décrits	10	
1.4.	Fiche de désordre type	12	2
Chapitre 2	Les étapes du diagnostic	13	
2.1.	Les origines possibles des désordres - les facteurs d'influence	13	
2.1.1.	Facteurs liés au site	13	
2.1.2.	Facteurs liés à la construction	17	
2.1.3.	Facteurs liés à la vie de l'ouvrage	20	
2.2.	Le pré-diagnostic	21	
2.3.	Les pathologies	22	
2.3.1.	Cas des excavations non revêtues	22	
2.3.2.	Cas des excavations revêtues	23	3
2.4.	Le diagnostic final	25	
Chapitre 3	Comment conduire une inspection détaillée	29	
3.1.	Comment préparer l'inspection	29	
3.1.1.	Programmation	29	
3.1.2.	Étude des documents existants	29	
3.1.3.	Travaux préparatoires	29	
3.2.	Comment réaliser l'inspection	30	
3.2.1.	Le travail de terrain	30	
3.2.2.	Le travail de bureau	34	4
Chapitre 4	Aspect réglementaire	37	
4.1.	Les ouvrages concernés	37	
4.2.	La périodicité	38	
4.3.	Les intervenants et leur rôle	38	
4.4.	Les conditions de sécurité	38	
	Documentation	39	
Annexes 1	Logigramme d'organisation de la surveillance des tunnels	43	5
2	Éléments d'un cahier des charges type d'inspection détaillée	44	
3	Conditions de sécurité	50	
4	Principes de partition d'un tunnel	54	
5	Conception et codification des levés d'intrados	56	
6	Marquage d'un tunnel	60	
7	L'évaluation IQOA	62	
8	Cadre type de rapport d'inspection détaillée	65	
9	Les différentes parties d'un tunnel au sens de l'inspection	69	
10	Le fonctionnement d'une voûte de tunnel	74	
11	Analyses et caractérisation des matériaux	76	
12	Investigations et essais complémentaires	78	A

Introduction générale

1

Pourquoi inspecter les tunnels ?

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 durant le temps écoulé depuis cette époque), les désordres constatés sur les ouvrages sont différents.

Dans les tunnels anciens, la présence d'un revêtement est par exemple révélatrice des craintes ressenties lors de la construction vis-à-vis du terrain, les parties non revêtues étant *a contrario* celles où le rocher était le plus sain. Les venues d'eau sont aussi la cause de nombreux désordres, et constituent une gêne à l'exploitation.

Le point commun des tunnels tient au fait que leur comportement est directement influencé par celui du massif de terrain dans lequel ils ont été creusés, car le terrain fait vraiment partie intégrante de l'ouvrage en imposant le rythme et l'intensité des évolutions.

L'exemple d'une évolution lente est apporté par un vieil ouvrage transalpin dont la maçonnerie n'a commencé à montrer des désordres (écaillage mécanique) que 100 ans après sa construction, la poussée du massif rocheux ayant été très différée dans le temps du fait de l'espace important entre le revêtement et le terrain.

L'évolution au contraire peut se manifester très vite dans le cas d'un tunnel dont le revêtement est bien plaqué au terrain, lorsque celui-ci est gonflant.

Les évolutions sont presque toujours prévisibles à 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 rencontrées ;
- d'autre part sur l'inspection détaillée périodique des ouvrages.

Si ce guide n'aborde pas l'inspection des tranchées couvertes, c'est parce que le rôle du terrain encaissant n'est pas le même, et que son importance est généralement bien moindre. Il en résulte d'autres pratiques pour les inspections et un référentiel de désordres différent, plus proche de celui des autres ouvrages d'art.

Quel contexte réglementaire ?

Le fascicule 40 présente les dispositions particulières de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979, révisée en 1996, pour ce qui concerne les tunnels et les tranchées couvertes. Il précise les obligations des gestionnaires en matière de surveillance, d'entretien et de réparation.

Le présent guide restreint son champ d'application au seul génie civil des tunnels creusés mais, en revanche, détaille la méthodologie de réalisation et d'exploitation de leur inspection. Il est en cela un complément à vocation opérationnelle auquel renvoie fréquemment le fascicule 40.

Comment s'organise une inspection détaillée ?

L'inspection comporte deux phases bien distinctes :

- **1^{re} phase : Observation des désordres** : il s'agit de « traquer » tous les désordres et de les décrire. Il est à noter que le revêtement constitue un remarquable outil d'auscultation qui traduit en désordres les manifestations évolutives du terrain encaissant, mais avec un certain retard. C'est une tâche très délicate car pleine de contradictions. En effet, il faut un esprit d'observation sans *a priori* pour accepter de découvrir ce que l'on ne s'attend pas à trouver et en même temps une bonne dose *d'a priori* :
 - par la connaissance de l'histoire antérieure du tunnel (ce qui nécessite de s'assurer que l'information a bien été rassemblée),
 - par la connaissance générale des désordres susceptibles de se produire (expertise, expérience, catalogues de désordres).

- **2^e phase: Compréhension des pathologies**: alors que la phase précédente est menée symptôme par symptôme, le diagnostic doit être établi en prenant en compte l'ensemble des symptômes ; il s'appuie sur l'identification des facteurs influant sur l'évolution de l'ouvrage, facteurs que l'on a l'habitude de classer en :
 - facteurs liés au site (massif, eau, environnement),
 - facteurs liés à la construction (conception, réalisation, matériaux),
 - facteurs liés à la vie de l'ouvrage (exploitation, surveillance et entretien).

Le présent guide porte sur ces deux phases.

Le lecteur trouvera dans le Guide de réparation (à paraître) des informations sur les phases suivantes, qui s'intègrent dans la démarche de réparation et comportent en particulier :

- *l'établissement du diagnostic détaillé,*
- *la définition du programme exigentiel (de façon à prendre en compte l'éventuel besoin de remise à niveau du tunnel) et les études préliminaires (examen des solutions techniques et de leurs coûts),*
- *l'étude détaillée des travaux à réaliser,*
- *la réalisation des travaux,*
- *la remise en service.*

Le **catalogue des désordres** constitue la partie principale de ce guide ; il est présenté dans le **chapitre 1**. Bien évidemment, les ouvrages anciens occupant une place prépondérante, les données concernant leurs désordres y sont plus nombreuses. De plus, les méthodes modernes sont supposées être plus sûres et les désordres sont pour l'instant moins nombreux ou pas encore détectables.

Le **chapitre 2** récapitule les étapes de la démarche et définit les principales orientations pour identifier les pathologies et leurs causes.

Dans le **chapitre 3**, le lecteur trouvera des conseils pour l'organisation pratique et la conduite des opérations d'inspection.

L'inspection détaillée constitue l'étape la plus élaborée de la surveillance organisée des ouvrages d'art. Des rappels succints sur le contexte réglementaire et sur les procédures de surveillance des tunnels du réseau routier national sont donnés dans le **chapitre 4**.

Les **annexes** sont, pour certaines, communes avec celles du fascicule 40 de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (version révisée), et pour les autres apportent des compléments d'information utiles pour l'utilisation de ce texte.

Chapitre 1

Présentation du catalogue des désordres

Le choix a été fait de regrouper la présentation de l'ensemble des désordres dans un fascicule à part, permettant ainsi aux professionnels de disposer de fiches plus pratiques à utiliser.

Le présent chapitre introduit ce catalogue en précisant en particulier un certain nombre d'éléments de vocabulaire utiles.

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

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

► *L'héritage du passé est toujours présent*

Parallèlement, si la remise à niveau des tunnels anciens les plus dégradés tend à faire disparaître progressivement certains désordres autrefois courants, ils perdurent sur une partie non négligeable des tunnels routiers. Il est important de ne pas en perdre la connaissance.

Ce catalogue constitue donc une actualisation, pour ce qui concerne les tunnels routiers, du *Catalogue des défauts apparents des tunnels* publié par l'AFTES en 1980.

► *«Savoir voir et savoir quoi voir»*

L'inspection d'un ouvrage est une démarche naturaliste, fondée d'abord sur l'observation et la description. Le choix a donc été fait d'approcher les désordres par leur apparence plutôt qu'au travers des facteurs qui les déclenchent. Les désordres peuvent être très discrets ou au contraire spectaculaires, aussi bien dans leurs manifestations visibles que dans leur extension ; mais leur gravité n'est pas obligatoirement fonction de leur «visibilité». Aussi est-il 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, si possible pendant l'inspection. La gravité ou l'évolution d'un désordre dépend constamment d'un équilibre, toujours instable, entre les deux causes suivantes, étroitement liées :

- les causes dites «internes» qui sont liées aux caractéristiques intrinsèques des matériaux de revêtement ou du terrain (composition, porosité, texture, micro fissuration, etc.), que l'on pourrait assimiler à des «faiblesses» ;
- les causes dites «externes» qui sont 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, de fonctionnement, non exclusives les unes des autres. L'influence de l'eau est omniprésente.

L'apparition tardive de désordres impose toujours de revenir à la conception et aux conditions de réalisation. Il est donc primordial de consulter l'intégralité des archives d'un ouvrage, et tout particulièrement les comptes-rendus journaliers des surveillants de chantier.

Le catalogue des désordres est introduit par les trois paragraphes suivants :

- terminologie ;
- liste des désordres décrits : ce tableau synthétique croise les désordres décrits dans les fiches avec les 8 facteurs d'influence développés au paragraphe 2.1. ;
- fiche de désordre type : ce modèle commenté en explique les contenus.

1.2. Terminologie

De nombreux termes sont employés dans la littérature technique pour évoquer les « défauts » (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.

Après un rappel de quelques définitions officielles, nous proposons des définitions simples applicables dans le cadre des inspections de tunnels.

1.2.1. Définitions officielles

Les trois définitions présentées ci-après sont extraites de l'annexe 2 du *Guide pour une démarche d'Assurance Qualité* (Document SETRA référence F 9775).

Le terme « **défaut** » est défini de manière générale par la norme ISO 8402 de 1994 :

« Non satisfaction à une exigence ou à une attente raisonnable liées à une utilisation prévue, y compris celles qui ont trait à la sécurité ».

Le terme « **anomalie** » est défini par la norme française NFX50-125 de 1995 :

« Écart entre une situation existante et une situation attendue ».

Note associée : « Une anomalie justifie une investigation qui peut déboucher sur la constatation d'une non-conformité ou d'un défaut ».

Le terme « **risque** » est défini comme un « danger éventuel plus ou moins prévisible ».

En revanche, le terme « **désordre** » ne fait l'objet d'aucune définition officielle.

1.2.2. Définitions proposées

Les termes sont classés par ordre de gravité croissante.

■ Défaut

C'est une imperfection, généralement visible, ponctuelle ou systématique, affectant une partie d'ouvrage. Ce terme s'applique à une partie construite (on ne parle pas de défaut géologique).

EXEMPLES

- « défauts d'aspect » des parements ;
- défaut d'alignement d'une maçonnerie, d'anneaux de béton, lors de la construction ;
- déformation ponctuelle d'un coffrage, reproduite dans chaque anneau coulé.

Ils restent parfois invisibles et sans conséquence, mais ils peuvent aussi participer à un désordre ou le provoquer. La plupart des défauts rencontrés en tunnel n'ont aucune incidence sur la sécurité ou la pérennité des structures.

■ Malfaçon

Elle résulte d'une tâche manifestement mal exécutée, ou de spécifications non respectées.

EXEMPLES

- en tunnels anciens non revêtus, hors profils importants mal maîtrisés au creusement ;
- ségrégations ou reprises de bétonnage trop importantes en béton coffré ;
- venue d'eau en tunnel étanché, dénotant une blessure de la feuille d'étanchéité ;
- armatures mal positionnées en béton armé.

Une malfaçon peut parfois évoluer en désordre. Certaines malfaçons cachées génèrent à terme des désordres visibles.

■ Désordre

Il s'agit d'un problème affectant un élément ou une partie d'ouvrage, qui se manifeste progressivement ou brutalement, et qui dénote une **évolution**. C'est un **symptôme**.

Le synonyme le plus proche est «avarie», employé en particulier 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 des eaux.

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 termes ci-dessous illustrent bien l'évolution possible de certains désordres (d'après Beltrémieux, 1972).

- **désordre «éteint»**: des réparations ultérieures ont supprimé la cause du désordre bien que ses traces soient encore visibles (ex: *maçonnerie régénérée mais déformation toujours apparente*);
- **désordre «dormant»**: il est susceptible d'être réactivé par une modification des conditions locales (ex: *reprise d'un glissement à une tête, gonflements liés à une hydratation des argiles,...*);
- **désordre «actif»**: les conditions courantes l'entretiennent.

Cette activité peut se manifester de façon :

- **continue** (ex: *altération chimique*);
- **par à-coups** (ex: *déformation, fissures, écaillage*),
- **cyclique** (ex: *désordres liés à la respiration saisonnière du revêtement, avec ou sans dérive dans le temps*).

■ Pathologie

On peut la définir 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.

1.2.3. Termes liés au débit des venues d'eau

L'eau qui apparaît à l'intérieur de l'ouvrage peut être décrite 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 thermique et aéraulique 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

Écoulement visible à partir d'un exutoire repéré. Il devient possible d'estimer, voire de jauger un débit.

On distingue les venues d'eau ponctuelles (gouttes) et les venues d'eau continues (débit plus important). Les remontées d'eau au travers des chaussées peuvent être qualifiées de résurgences, ce qui les différencie d'une humidité provenant de la voûte ou des véhicules.

1.2.4. Termes liés aux manifestations de l'eau

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 qualifier.

■ Concrétions

Ce terme est réservé à tous les dépôts solides et adhérents : carbonate de calcium (ou calcite), sulfate de calcium (ou gypse), hydroxyde de fer (ou goethite).

■ Efflorescences

Cette appellation spécifique s'applique à des exsudats fragiles et temporaires, qui apparaissent dans certaines conditions d'humidité du support ou de l'air, et 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).

■ Dépôts

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

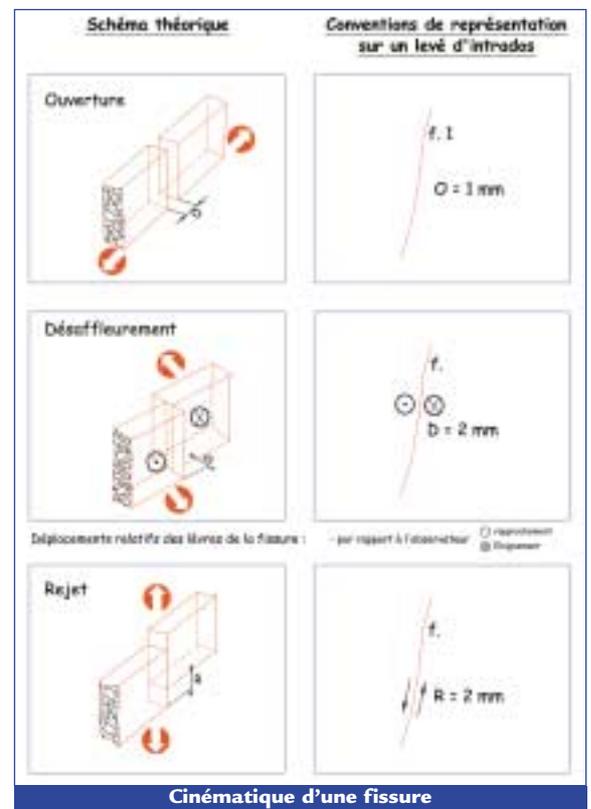
Dans le cas de drains, collecteurs, examinés à leur débouché ou par endoscopie vidéo, on s'attache à différencier les concrétions (produits solides) des accumulations diverses (fines, sables, boues, pertes de coulis, d'enrobés, de béton..). On parle donc de drain « concrétionné » par de la calcite, ou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

1.2.5. Description de la fissuration

La **fissuration** est un défaut ou un désordre courant dans les structures. Il est important de bien la décrire.

La figure suivante illustre 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 chaque fois qu'il est possible.

Le terme « **fracture** » est parfois employé en ouvrages d'art. La limite entre « fissure » et « fracture » n'est pas codifiée et reste subjective. Une fracture signifie théoriquement qu'il y a rupture complète de la continuité d'une structure et mise en danger de celle-ci. Un tel jugement est plus difficile à porter en tunnel du fait de l'interaction omniprésente du terrain, masqué par un revêtement dont on ne voit qu'un seul côté. Aussi, le terme n'est-il pas employé dans ce guide. On parle toujours de fissure, mais en y associant systématiquement au moins la valeur de son ouverture. Seule une interprétation d'ensemble pourra cerner la présence d'un risque éventuel dans une zone donnée.



1.3. Liste des désordres décrits

Le tableau suivant croise les désordres décrits dans les fiches avec les facteurs d'influence évoqués au chapitre 2. Il permet de constater que la plupart des désordres peuvent avoir plusieurs origines (notées +). Le facteur prépondérant éventuel est distingué (noté ++).

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

1.4. Fiche de désordre type



Description (aspect visuel du désordre)

Comment se manifeste et se caractérise le désordre.

Méthodes d'examen

Comment l'appréhender, voire le découvrir s'il n'est pas visible.

Paramètres à relever

Comment bien le décrire.

Désordres ou défauts associés à rechercher

Examen étendu de la zone du désordre.

Origines, causes possibles, facteurs aggravants

Interpréter en fonction de ce que l'on connaît déjà de l'ouvrage ; pré-diagnostic.

Existence de contraintes fortes liées au terrain, à l'eau, à l'exploitation, à l'environnement.

Conséquences, évolutions possibles

Permettre de hiérarchiser les désordres rencontrés dans un esprit de gestion des risques et de la surveillance.

Dangers pour les usagers

S'adresse à la surveillance continue.

La teinte rouge du bandeau signale l'existence d'un danger lié au désordre ([L'évaluation IQOA p. 62](#)).

Risques pour les structures

Pour amorcer une réflexion sur les actions à entreprendre.

La teinte du bandeau correspond à celle de la note IQOA maximale qui peut être affectée au désordre ([L'évaluation IQOA p. 62](#)).

Surveillance

Quel type de surveillance mettre en place (y compris la surveillance continue).

Remèdes

Une base de réflexion.

Observations

Remarques diverses.

2^e volet

Informations complémentaires, photos ou schémas permettant d'affiner la connaissance du désordre.

Chapitre 2

Les étapes du diagnostic

1

Le diagnostic sur l'état d'un ouvrage ou de l'une de ses parties doit pouvoir répondre aux quatre questions suivantes (d'après recommandation AFTES) :

- quelles sont les causes des désordres ?
- comment les désordres peuvent-ils évoluer ?
- quel est le degré d'urgence des actions à entreprendre ?
- quelles études ou quels travaux faut-il prévoir ?

2

Après l'observation des désordres, dont le chapitre 1 a introduit le catalogue, la démarche menant au diagnostic comporte les étapes suivantes :

- le **pré-diagnostic**, établi dès le rapport d'inspection, qui doit répondre à la première question, et proposer une hypothèse sur l'évolution possible ;
- 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, qui conduit à définir un mode de réparation adapté.

3

Avant d'aborder ces étapes, et pour aider à la caractérisation des désordres, il convient tout d'abord de récapituler les facteurs d'influence susceptibles d'en être à l'origine.

2.1. Les origines possibles des désordres – Les facteurs d'influence

La spécificité des tunnels par rapport aux autres ouvrages d'art réside, cela a déjà été souligné, dans l'implication plus forte du terrain sur les oeuvres construites. Quand un revêtement existe, seul son intrados est révélateur d'une modification de l'interaction entre ouvrage et massif encaissant. D'autre part, suivant son âge et sa qualité, le revêtement peut avoir sa propre évolution en dehors de tout comportement anormal du massif.

Certains désordres et défauts ont des apparences identiques (par exemple, les déformations locales d'une maçonnerie) mais peuvent avoir des causes tout à fait différentes. Pour établir le diagnostic, il faut donc établir l'origine des désordres observés sur le revêtement.

Avant d'aborder les origines des désordres, on pourra consulter **les annexes 9** ( **Les différentes parties d'un tunnel p. 69**) et **10** ( **Le fonctionnement d'une voûte de tunnel p. 74**).

La grande diversité des tunnels creusés existant en France est liée à la variété des âges, des conceptions, et des structures géologiques traversées. Il est nécessaire, pour assurer leur bonne gestion, de connaître les principaux facteurs qui ont une influence sur leur vieillissement et qui peuvent provoquer des désordres ou engager la sécurité des usagers. Le classement des facteurs utilisé ci-après ne doit pas faire oublier que plusieurs facteurs peuvent agir ensemble. Déterminer la part relative de chacun d'entre eux sera la principale difficulté dans l'établissement du diagnostic final.

4

2.1.1. Facteurs liés au site

Ils peuvent être de deux natures :

- les caractéristiques géologiques et géotechniques des terrains traversés sont des données intangibles qui ont déterminé des difficultés surmontées avec plus ou moins de bonheur lors de la construction. Certains de ces terrains évoluent naturellement avec des conséquences défavorables à long terme pour les structures. Dans le cas des tronçons non revêtus, la géologie a une incidence directe sur la sécurité des usagers du tunnel. L'hydrogéologie du massif peut jouer un rôle initiateur ou accélérateur dans le vieillissement des structures ;
- les aménagements existants ou récemment mis en place dans l'environnement immédiat d'un tunnel peu profond (particulièrement en couverture) peuvent modifier le comportement du massif et se répercuter dans l'ouvrage ou à ses extrémités par l'apparition de désordres au niveau des structures.

5

A

► Massif rocheux (ou terrain encaissant)

■ Ses caractéristiques

Il s'agit principalement de la structure originelle du massif, de l'état de fracturation et de la résistance à l'altération de la roche. Ces données, qui peuvent être appréhendées directement par l'observation dans un tunnel non revêtu, sont détaillées ci après.

Structure du massif

Elle est souvent inscrite dans la forme des anciennes excavations non revêtues. Dans les terrains sédimentaires bien stratifiés, on préférerait parfois conserver un banc compact formant « toit » plutôt que de le morceler. Nombre d'excavations anciennes sont ainsi très angularisées. Après plusieurs décennies, ces profils de formes très irrégulières évoluent mal et génèrent des instabilités.

Les séries sédimentaires sont souvent constituées d'une alternance de bancs durs (calcaire) et de bancs ou d'interlits plus tendres (marnes). Cette structure provoque des instabilités spécifiques par altération progressive des couches tendres.

Il en est de même pour les roches peu métamorphisées (grossièrement appelées « schistes »), dont le feuilletage plus ou moins prononcé génère des instabilités de plaques.

L'orientation dans l'espace ainsi que le remplissage des discontinuités principales (strates, diaclases) jouent un grand rôle dans l'apparition et le renouvellement des instabilités. Les propriétés hydrauliques des joints rocheux naturels sont très variables selon la qualité des eaux qui les traversent. Les joints peuvent se colmater ou au contraire devenir plus perméables, selon la nature de leur remplissage et la composition chimique de l'eau.

Dans le cas de roches dures d'origine magmatique ou métamorphique, l'intrados reflète la disposition des discontinuités naturelles, s'organisant grossièrement suivant un trièdre principal et des discontinuités secondaires.

Certaines roches ne sont pas bien stratifiées ni structurées. C'est le cas d'anciennes accumulations détritiques (molasses, conglomérats), volcano-détritiques (brèches pyroclastiques); si leur recimentation (d'origine ou tardive) est suffisante, elles se comportent comme des roches quasi homogènes.

Fracturation

La fracturation de la roche, d'origine diagénétique ou tectonique, a pu aussi être fortement aggravée par les méthodes de creusement.

Une fragmentation fine (dont la maille peut descendre jusqu'à quelques centimètres seulement) crée à la surface de la voûte une « peau » instable.

Tous les massifs rocheux sont affectés par des failles. Ces zones sont caractérisées par une fracturation plus intense, le stade ultime est parfois 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 réseaux karstiques recoupés par une excavation introduisent un risque de venues d'eau brutales, parfois chargées de matériaux (débousses).

Résistance à 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 et donc à diminuer la tenue de l'excavation.

Un massif a une sensibilité à l'altération qui dépend de la nature de ses minéraux, de leur texture, ainsi que de la porosité.

- Les roches sédimentaires à ciment calcaire sont sensibles à la dissolution de leur liant (exemple des molasses devenant sableuses et friables).
- Les évaporites telles que les gypses sont sensibles à la dissolution, conduisant à la formation de cavités. L'anhydrite (sulfate de calcium anhydre) possède un fort potentiel de gonflement si elle est associée à des minéraux argileux (smectites). Elle peut être très compacte et ne poser aucun problème lors de l'excavation, mais en poser en différé du fait de sa solubilité.
- Certains conglomérats évoluent par chute des éléments solides, phénomène dû à l'altération de leur matrice (ou ciment naturel). Cela conduit parfois au développement de grands hors profils le long des zones de moindre cohésion.

- Les roches cristallines, malgré un aspect massif et dur, peuvent être déjà profondément altérées au niveau de leurs minéraux ; il s'agit d'une transformation ancienne, hydrothermale, qui a généré la formation de minéraux phylliteux, s'apparentant à des argiles, et donc très sensibles à l'eau. La progression de l'altération peut y être beaucoup plus rapide que dans un calcaire ou un grès.
- Cette progression peut être accélérée dans les roches métamorphiques dont la foliation originelle permet une pénétration plus facile de l'eau.

Enfin, quelle que soit la nature de la roche, sa micro-fissuration conditionne sa porosité et la progression de l'altération.

L'action de l'eau est importante sur le remplissage des fissures ou diaclases, car elle diminue d'abord la cohésion du matériau, puis l'entraîne peu à peu.

■ Son évolution

On appelle comportement différé les modifications affectant le massif encaissant à proximité de l'excavation. Il est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels on peut citer la nature de la roche, l'épaisseur de la couverture et son état de fracturation, le régime hydraulique interne au massif influencé par l'effet de « drain » introduit par l'excavation, les effets de la gravité à la surface de celle-ci.

Tout massif rocheux se décomprime naturellement et plus ou moins rapidement à partir de sa surface libre. Cette décompression superficielle peut créer des instabilités dangereuses de volumes variables à la surface de l'excavation, les instabilités se régénérant malgré des purges périodiques.

Fluage et gonflement du massif peuvent également avoir des répercussions graves sur les structures.

Trois cas de figures peuvent se présenter :

Tunnels (ou tronçons) non revêtus : si certains tunnels peuvent subsister sans revêtement et sans désordre grave, c'est que l'état de contrainte régnant dans le massif proche est faible vis à vis de ses caractéristiques mécaniques. Les désordres sont essentiellement les décollements et chutes de blocs déterminés par les discontinuités (action de la gravité). Dans le cas contraire (fortes contraintes) la roche va céder par écaillage.

Tunnels revêtus anciens : de nombreuses reconnaissances (sondages endoscopés, fenêtres) au travers de maçonneries ont montré l'existence de vides plus ou moins importants provenant d'un défaut de blocage au terrain. La décompression du terrain peut alors se poursuivre comme dans une excavation non revêtue. Quand le terrain est au contact du revêtement, il « pèse » sur celui-ci et peut provoquer des déformations voire des ruptures si les sollicitations deviennent trop fortes. Fluage ou gonflement peuvent produire les mêmes effets sur des voûtes parfaitement bloquées au terrain.

Tunnels revêtus modernes : le terrain excavé est rapidement confiné par le soutènement. Les revêtements ne sont théoriquement plus soumis aux actions du terrain sauf à long terme s'il a un comportement différé notable.

▶ Action de l'eau

L'eau agit en tunnel suivant des processus physiques et chimiques, qui sont toujours intimement liés et permanents. 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 11** résume les principales analyses à effectuer sur les eaux rencontrées en tunnel.

■ Ses actions physiques

Imbibition

L'augmentation de la teneur en eau de certains matériaux sensibles les altère et les ameublissent, rendant possible leur transport vers un espace libre.

EXEMPLE

Arène granitique sableuse, brèches de failles altérées, remplissages de diaclases, interlits marneux, mortiers ou bétons altérés à cœur.

Érosion

L'action mécanique d'un ruissellement entraîne les particules libres vers les points bas de la structure (cas des mortiers de blocage qui disparaissent en clé de voûte), ou dans la partie circulée (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.

Transport et dépôt

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, l'existence d'un gel prolongé peut avoir une influence néfaste sur les structures (accumulations de glace) mais aussi jusqu'au niveau granulaire 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.

En termes d'exploitation, les accumulations de glace et le verglas (qui peut se former assez loin en tunnel) nécessitent des interventions quotidiennes. La mise en place systématique des étanchéités extradors en tunnels neufs supprime une partie de ces problèmes.

Pression, débit

Ces paramètres sont commandés par l'hydrogéologie complexe des milieux fracturés.

Les débits qui parviennent en tunnel (ou au contact de son revêtement) empruntent le plus souvent un réseau de fissures plus ou moins dense et ouvert ; ils sont donc éminemment variables.

La plupart des tunnels routiers creusés étant situés hors nappes phréatiques, les mises en pression du revêtement sont exceptionnelles, le plus souvent de faible durée, et n'affectent jamais la totalité de l'ouvrage. Elles peuvent survenir au droit de zones plus perméables, de karsts ouverts ou de failles, concentrant des débits temporairement forts au droit de structures mal drainées (tunnels anciens) ou dans des zones de défauts de feuille d'étanchéité (tunnels récents).

■ Ses actions chimiques

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

Le béton est un milieu fortement basique sur lequel le milieu 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 vont 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 néo-formation (ettringite «secondaire») qui désagrègent particulièrement les mortiers mais aussi parfois les bétons.

L'emploi de ciments avec ajout de laitier (au moins 60%) permet une meilleure résistance aux sulfates.

L'alcali-réaction

C'est un ensemble de réactions chimiques très complexes, au sein du béton, entre certaines formes de silice ou de silicates pouvant être présentes dans les granulats, et les alcalins du béton. Il se forme des produits de réaction (de type gel et/ou cristaux) provoquant expansion, fissuration de la masse du béton, voire exsudation 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 formellement identifiée en tunnels routiers. En effet, les bétons de tunnels, hormis aux têtes, sont mieux protégés contre le renouvellement continu des eaux de ruissellement.

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 décohesion progressive du béton. Ce type d'agression peut se rencontrer dans les caissons immergés en mer.

■ Ses actions bio-chimiques

Les micro-organismes sont omniprésents dans les sols et les terrains et parmi eux, certaines bactéries :

- 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 ;
- bactéries nitrifiantes, produisant des acides nitreux ou nitriques, 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 spécifique ou notable ne puisse leur être attribué jusqu'ici dans les tunnels routiers.

► Environnement

■ L'environnement physique d'un tunnel

Un tunnel étant par essence intimement lié au terrain, les interactions sont permanentes :

- la zone d'influence **sur** l'ouvrage peut s'étendre assez loin de celui-ci (ex : glissement de versant). Les actions humaines peuvent modifier les conditions locales et se répercuter sur les structures enterrées (carrières, voirie nouvelle, immeubles, rejets divers) ;
- la zone d'influence **de** l'ouvrage s'étend naturellement au volume de terrain plus ou moins important qui l'entoure (risques de fontis, tassements, tarissement de sources), mais aussi au terrain naturel qui borde les têtes (chutes de pierres, pollutions accidentelles, ...).

Certaines parties de tunnels immergées et remblayées ou au contraire en contact avec l'élément liquide, peuvent souffrir de cette exposition (courant de crue, houle, marées). En milieu maritime, l'action des chlorures peut être un accélérateur de la corrosion des armatures.

■ L'influence climatique

Les variations de température, principalement aux têtes mais aussi en section courante, introduisent des phénomènes de dilatation/rétractation sur les structures, mais aussi jusqu'au niveau granulaire de certains matériaux (mortiers, moellons, bétons poreux), accélérant parfois leur altération.

Elles sont intimement liées aux mouvements de l'air qui introduisent des dessiccations très rapides, et par conséquent des transferts de vapeur d'eau et des migrations de sels au sein des matériaux. Certains ouvrages de grande longueur entretiennent leur propre micro-climat.

■ Sismicité, tectonique

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 en harmonie avec celui-ci en cas de séisme.

Les micro-séismes réguliers (sud de la France en particulier) ont forcément une incidence à long terme sur la stabilité des masses rocheuses. Les mouvements tectoniques actifs, dont l'existence est prouvée dans les régions alpines en particulier, pourraient être à l'origine de certains désordres affectant les structures, sans qu'il soit possible d'affirmer actuellement qu'ils en sont la cause unique.

Dans les tunnels modernes, certaines structures du génie civil de second oeuvre, suspendues ou en appui (dalles de ventilation, cloisons, chaussées superposées), pourraient mal réagir à certains mouvements d'origine sismique. Dans les tunnels anciens, des revêtements altérés ou mal bloqués au terrain pourraient souffrir à partir d'une certaine magnitude.

2.1.2. 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 aléas 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.

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).

Tous ces « défauts d'origine » devront donc être gérés au mieux et si possible éliminés par des opérations programmées de remise à niveau pour autant qu'ils soient jugés rédhibitoires pour la sécurité ou l'exploitation.

► 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 et 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 TUNNELS ANCIENS

La construction de la voûte en maçonnerie sous une cloche d'effondrement, conduisant 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 extradors a pu se faire 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.

► 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. Ce dernier point explique aussi des malfaçons parfois graves ou systématiques, qui ne se révèlent que bien plus tard dans la vie de l'ouvrage.

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

■ 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.

■ Soutènement

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).

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 roches les plus sensibles au contact de l'air, des désordres pouvaient (et peuvent toujours) apparaître très rapidement. Actuellement ce problème, relativement rare, n'apparaît que lors du creusement et peut être réglé par un drainage et un soutènement appropriés.

■ 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 revêtement, 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'épaisseur très variable, 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 extradados 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.

► *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, qui étaient 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 du même âge. La régularité géométrique de leurs assises 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, mais parfois dans l'emploi de granulats inadaptés ou altérables, contenant des minéraux à risque pour la durabilité des liants (pyrite, sulfates), mais aussi 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 50.

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

Auparavant, les rares mises en place de feuilles imperméables avant le bétonnage n'étaient destinées qu'à limiter le délavage 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.

■ 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.

2.1.3. Facteurs liés à la vie de l'ouvrage

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.

Trafic

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

■ Effets permanents

Même en présence de ventilation forcée, la pollution de l'air favorise la corrosion des équipements, beaucoup moins celle du génie civil. Les vibrations engendrées par la circulation sur les dalles de chaussée reposant sur appuis provoquent une fatigue et des désordres sur ceux-ci.

■ Effets courants

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

■ Effets accidentels

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 de piédroits ou les tôles parapluies.

■ Évènements exceptionnels

Les incendies font également partie des actions accidentelles. Les plus graves ont des conséquences qui sont très variables selon leur importance et leur durée, et peuvent conduire à une diminution des caractéristiques mécaniques des matériaux et de la résistance des structures, et, pour les bétons, à un écaillage sur des épaisseurs variables.

Certains tunnels dont une partie est immergée (point bas dans le profil en long) peuvent être inondés simplement par une concentration des ruissellements de voirie extérieure que les pompes d'exhaure ne peuvent évacuer.

▶ Surveillance et entretien

Quelles que soient l'importance de l'itinéraire ou la complexité d'un ouvrage, une surveillance régulière et si possible 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 au génie civil tout autant qu'aux équipements.

EXEMPLES

- en tunnel non revêtu, la présence de pierres sur les bas-côtés ou les trottoirs doit être signalée au plus tôt car c'est l'indice d'un risque naissant;
- en tunnel revêtu de section réduite, il faut vérifier périodiquement si un frottement localisé des poids-lourds ne fragilise pas le revêtement;
- des zones humides apparaissant en chaussée doivent être rapidement détectées car c'est le signe d'un dysfonctionnement du drainage;
- les abords immédiats des entrées sont à examiner périodiquement.

Ce type de surveillance doit permettre une bonne gestion des opérations d'entretien dit « courant » qui sont en premier lieu le nettoyage fréquent de la chaussée et des trottoirs (ou fils d'eau).

L'entretien spécialisé est généralement dévolu à des entreprises; il est déclenché par le gestionnaire en fonction de ce que la surveillance continue a décelé.

EXEMPLES

- purges des tronçons non revêtus suite à des chutes de pierres;
- hydro-curage de drains et collecteurs suite à des remontées d'eau en chaussée.

On a malheureusement pu 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 pour certaines parties d'ouvrage où l'apparition de désordres importants surprend alors qu'ils auraient pu être évités ou détectés plus tôt, à un stade moins avancé de leur évolution.

2.2. Le pré-diagnostic

Le pré-diagnostic doit apparaître dans les conclusions du rapport d'inspection détaillée. Il 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 premières questions que le diagnostic aura à traiter. Dans les cas plus complexes, des investigations complémentaires seront nécessaires afin de lever les incertitudes.

■ Origine et causes des désordres

Le syntagme de partition du tunnel (▶ [Principes de partition d'un tunnel p. 54](#) ▶) permet dans un premier temps de croiser les désordres observés avec les différentes structures composant le tunnel. Des corrélations peuvent apparaître. Dans un deuxième temps, on tente de dégager les principaux facteurs responsables de ces désordres.

■ Évolution

L'évolution de l'ouvrage a pu être déjà remarquée par le gestionnaire qui a alors déclenché 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 si 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, conseillé par des spécialistes, décidera des investigations complémentaires à réaliser pour confirmer les pathologies soupçonnées à l'issue du pré-diagnostic. Une liste des outils d'investigation est fournie en [annexe 12](#) ([Investigations et essais complémentaires p. 78](#)).

Le pré-diagnostic doit permettre de mettre en évidence des « tronçons sensibles » dans le tunnel, c'est-à-dire des secteurs dont l'état fait craindre l'apparition rapide de désordres. Ces tronçons peuvent alors donner lieu à une surveillance renforcée ([Comment préparer l'inspection p. 29](#)) ou à des investigations complémentaires comme évoquées ci-avant.

Ce découpage en tronçons a l'avantage, dès le pré-diagnostic, de focaliser l'attention du gestionnaire sur les secteurs du tunnel les plus délicats

2.3. Les pathologies

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 réparations fragmentaires n'ont pas réussi à améliorer.

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. 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). L'étape suivant l'inspection, qui sera le choix du "remède" à appliquer, pourra alors s'effectuer en toute connaissance de cause.

Des exemples de pathologies sont présentés ci-après, pour plusieurs types de revêtement.

2.3.1. Cas des excavations non revêtues

Les réseaux routiers comportent encore un linéaire important de tunnels (ou de tronçons) 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.

Paramètres d'origine défavorables :

- discontinuités nombreuses, présence d'argile, roche altérable ;
- déroctage violent, purge incomplète (y compris en cas d'alésage ultérieur).

Risques :

- chute de masses plus ou moins volumineuses.

Évolution :

- poursuite de la décohesion du massif s'il n'y a pas de confortations.

Investigations complémentaires :

- étude géologique et géotechnique.

Remèdes :

- toujours associer des confortations aux opérations de purges.



1

2

3

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.

2.3.2. Cas des excavations revêtues

En présence d'un revêtement, 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 à une époque donnée ;
- des pathologies « induites » par différents facteurs d'altération ou des actions antérieures.

4

Les maçonneries

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. Celles qui subsistent encore atteignent parfois un tel degré d'altération, malgré leurs réparations périodiques, qu'il serait illusoire de vouloir les prolonger encore longtemps.

Il s'avère, par ailleurs, que les tunnels en maçonnerie sont souvent de petite section, ce qui en fait des secteurs d'étranglement sur les itinéraires.

Les réparations immédiates peuvent se limiter à ce qui est strictement nécessaires pour la sécurité, si une réfection totale, incluant en particulier la mise au gabarit de l'itinéraire, 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.

5

Pathologies d'origine :

- mauvaise qualité de l'appareillage, des moellons et des mortiers ;
- mauvais blocage du revêtement (vides, boisages) ;
- terrain évolutif mal pris en compte à la réalisation.

Pathologies induites :

- altération des mortiers entraînant déjoints et fragilisation ;
- déplacement des désordres existants, création de nouveaux désordres suite à des réparations inadaptées ;

A

- déformations du revêtement, particulièrement dans les profils en ogive ;
- écaillage mécanique si le revêtement est mis en étreinte par l'évolution du terrain.

Risques :

- une déformation locale du revêtement entraîne chocs et frottements de la part des poids-lourds, avec le risque de provoquer une ruine accidentelle ;
- dans le cas d'écaillage mécanique, des parties de moellons peuvent tomber sur les usagers.

Évolution :

- généralement lente, elle est peu apparente sur les maçonneries qui sont souvent sales (concrétions, suies, venues d'eau).

Investigations complémentaires :

- 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).

Remèdes :

- maçonnerie peu dégradée : drainage et rejointoiements ;
- maçonnerie très dégradée et/ou déformée : ancrages, reconstruction localisée, injections.

Les bétons coffrés (non armés)

Pathologies d'origine :

- les bétons très anciens sont généralement hétérogènes et peu compacts. Leur perméabilité favorise des altérations « à cœur » qui mettent parfois en danger les structures les plus minces ;
- hormis une fissuration de retrait traversante favorisant les venues d'eau, les bétons plus récents (non étanchés) ne montrent aucune pathologie très dangereuse ;
- les désordres liés aux feuilles d'étanchéité pourraient à long terme affecter la stabilité de certains anneaux coffrés (zones sonnantes le creux plus ou moins étendues) ;
- mauvaise conception de joints de bétonnage.

Pathologies induites :

- les attaques chimiques liées aux venues d'eaux agressives sont d'autant plus délétères que le béton est perméable ;
- les actions du terrain encaissant vont rapidement se matérialiser par des fissures ou des écaillages qui peuvent indiquer le mode de déformation de la structure, et cela quelle que soit la nature du béton ;
- mauvaise tenue de réparations localisées, ou anciennes.

Risques :

- chute d'éléments ou de débris de béton altéré ;
- ruptures locales de la voûte, risque de chute de panneaux.

Évolution :

- généralement lente pour l'altération en masse, elle peut être brutale si la surveillance n'a pas identifié les instabilités (panneaux fissurés, écaillages).

Investigations complémentaires :

- mesures des déformations (fissurométrie, convergence, nivellement) ;
- profilométrie ;
- forages de reconnaissance, fenêtres ;
- mesures de contraintes (vérin plat) ;
- essais de laboratoire (analyses de mortiers, d'eau, etc.).

Remèdes :

Certains désordres limités peuvent faire l'objet de réparations ponctuelles (zone gelée, venues d'eau ponctuelles, désordres spécifiques de joints entre anneaux,...).

Au contraire, pour les bétons anciens atteints d'une altération généralisée d'origine chimique, il est nécessaire de traiter l'ensemble du revêtement. Ce type de dégradation n'a pas été rencontré à ce jour dans les bétons récents. Une confortation même lourde peut être insuffisante si la rupture est due à la poussée du terrain.

Les bétons armés (et préfabriqués minces)

Pathologies d'origine :

- nappes d'armatures trop proches du coffrage (béton coulé) ;
- structure trop mince par rapport à la densité du ferrailage interne (préfabriqué).

1

Pathologies induites :

- corrosion des armatures et éclatement du béton ;
- fragilisation ou rupture par chocs ;
- décollement de ragréages anciens.

Risques :

- chute d'éléments, de parties d'élément ou d'écailles sur la chaussée.

Évolution :

- prévisible si la surveillance est bien conduite.

Investigations complémentaires :

- pour une structure sensible, mesure de la profondeur des fers, de la profondeur de carbonatation, analyse d'eaux.

Remèdes :

- les éclatements de béton par corrosion des fers sont d'abord dangereux pour les usagers ; il convient de les purger et de s'assurer qu'ils n'affaiblissent pas localement la structure affectée (cas des corbeaux d'appui par exemple). Si la structure est suffisamment massive et les désordres localisés, le ragréage systématique n'est pas conseillé, car il risque de provoquer une nouvelle instabilité par défaut d'adhérence.

2

Les bétons projetés**Pathologies d'origine :**

- épaisseurs insuffisantes ou irrégulières pouvant conduire à des instabilités ;
- mauvais enrobage des treillis soudés ;
- béton gelé pendant sa prise.

Pathologies induites :

- chute de plaques ou de plaquettes : gunites non armées trop minces (en voie de disparition) ;
- panneaux décollés par gonflement des terrains ou par le gel ;
- fissuration de retrait excessive ;
- éclatements localisés au droit d'éléments métalliques oxydés.

3

Risques :

- peu fréquents dans ce type de revêtement, principalement parce qu'un treillis soudé y est le plus souvent associé ;
- en revanche, la minceur du revêtement ne résistera pas à un gonflement venant du terrain, et la rupture sera très rapide.

Évolution :

- prévisible si la surveillance est très attentive.

Remèdes :

- purge des écailles, réfection avec drainage amélioré.

4

2.4. Le 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 abouti que lorsque l'ensemble des phénomènes observés dans le tunnel ont été identifiés et compris. Dans les cas les plus complexes, le diagnostic peut faire état de différentes hypothèses en les argumentant.

Le diagnostic doit permettre de concevoir ensuite le projet de réparation ou de réhabilitation en toute connaissance de cause.

5

L'exemple suivant nous paraît constituer une excellente illustration de la manière dont peut être établi un diagnostic conduisant à un mode de réparation bien adapté à la pathologie dont souffre un tunnel.

EXEMPLE DU TUNNEL-CANAL DE CONDES (HAUTE-MARNE)

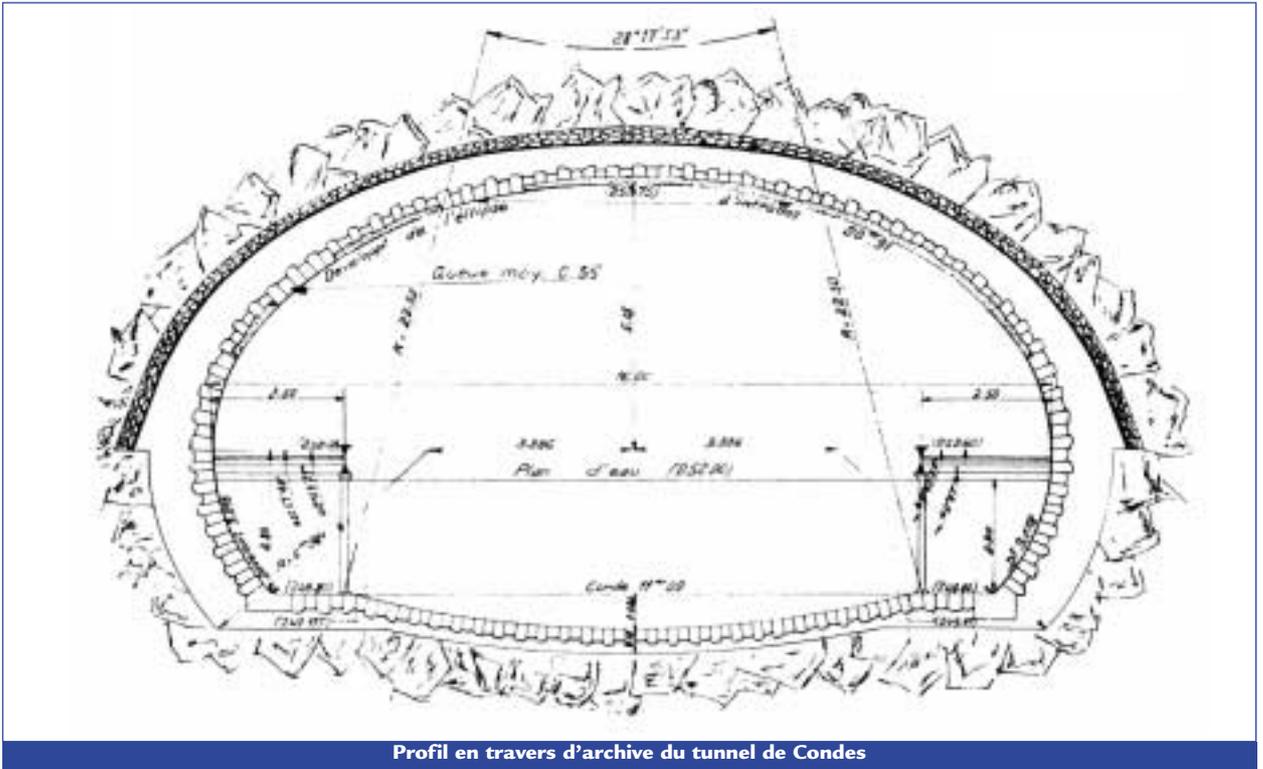
Les problèmes rencontrés dans cet ouvrage ne sont pas spécifiques aux tunnels canaux, mais peuvent se rencontrer dans tous les tunnels dont les structures sont similaires.

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).

A

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 est celui d'une ellipse à grand axe horizontal de 16m (petit axe 5 m) reposant sur des piédroits sub-verticaux situés en majeure partie sous le plan d'eau du canal.
Un radier contre voûté ferme ce profil sur toute la longueur du tunnel.
La passe navigable est de 11 m.



Le revêtement est constitué par une maçonnerie de moellons de calcaire oolithique dont l'épaisseur varie de 1 m en clé à 1,5 m en naissance (données d'archives). Le radier a une épaisseur supposée de 0,50 m.

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

2. Investigations et auscultation

– Une première inspection détaillée de la voûte hors d'eau a eu lieu en mars 1988 dans le cadre d'une campagne d'inspection de tous les tunnels canaux.

Cet examen visuel confirme une altération plus ou moins importante des parements, déjà signalée dès 1910. Des parties de moellons semblent tomber régulièrement créant des cavités dans le revêtement. Il s'agit en première approche d'une exfoliation des pierres aussi bien intensive (en profondeur) qu'extensive (en surface). On remarque aussi que ces désordres sont présents en tous points de l'intrados. En revanche, aucun autre désordre n'est visible, qu'il s'agisse de fissuration ou de déformation importante. Le radier n'est pas 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.

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

En voûte, l'extension latérale des altérations de pierres est très nette mais la profondeur des cavités ne dépasse jamais 25 cm.

Les piédroits situés sous les passerelles sont 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 montrent aussi un enduit superficiel en bon état et sans signe de fissuration ou de rupture. En résumé, les parties immergées sont en bien meilleur état que les parties à l'air libre.

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

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

Sur la première année de mesures, on constate seulement une respiration des bases variant entre $-0,4$ et $+0,6$ mm, ce qui est peu pour une voûte de cette ouverture. L'absence de déformation se confirme.

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

L'épaisseur moyenne du revêtement constatée dans les sondages est 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 présentent un feuilletage visible en profondeur.

Le terrain est rencontré à une profondeur de 1 à 2 m. L'espace annulaire est comblé par un blocage lié de mortier dans lequel du coulis verdâtre est visible. Les vides résiduels sont de l'ordre de 0,20 m. Le profil d'excavation semble très irrégulier du fait des hors profils latéraux liés à la stratification horizontale.

Le calcaire en place est solide (R_c 25Mpa).

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

– En septembre 2000, une cinquième campagne de mesures est demandée par l'exploitant.

Le résultat confirme la stabilité de la voûte. Aucune variation de longueur de base n'a dépassé le millimètre en 5 ans.

3. Diagnostic

Les mesures de convergences ont permis d'éliminer l'hypothèse d'une déformation du profil par écrasement. Si malgré tout, de fortes contraintes génèrent de l'écaillage mécanique, celui-ci se manifesterait en des points particuliers du profil en travers (en l'occurrence, les naissances) alors que les inspections ont constaté une répartition quasi homogène des désordres. Le problème du tunnel réside donc essentiellement dans la mauvaise qualité des moellons. La perte de matière introduit d'abord un risque pour les usagers du tunnel, mais peut 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, les anciens avaient déjà bien cerné le problème et adopté des solutions adaptées, 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 ont comblé une partie des vides et consolidé le corps de maçonnerie assurant sa bonne conservation jusqu'à nos jours (confirmé par les sondages).

4. Projet de réfection

Le principe de réparation proposé est donc 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 doit permettre à la fois de sécuriser le passage et de stopper l'altération des pierres.

5. Travaux

En 2002 : première tranche PM 150 à 205

Purges des exfoliations sur une épaisseur maximale de 10 cm.

Projection de béton afin de combler les cavités déjà exfoliées.

Pose et épinglage d'un treillis soudé sur toute la voûte.

Projection de béton (épaisseur 5 cm).

À titre d'essai, un anneau expérimental est réalisé entre les PM 175 et 181, en béton projeté fibré sans treillis soudé.

En 2003 : deuxième tranche PM 50 à 150, 205 à 308

Purges des exfoliations sur une épaisseur maximale de 10 cm.

Projection de béton afin de combler les cavités déjà exfoliées.

Pose et épinglage d'un treillis soudé en partie supérieure de la voûte sur 10 m de développée.

Projection de béton avec fibres métalliques (épaisseur 5 cm).

6. Conclusion

À la suite des travaux de chemisage, une inspection détaillée réalisée en 2004 a fixé le nouveau « point zéro » de la surveillance. Avec un recul d'un an, les coques réalisées ont une très bonne tenue. L'anneau expérimental armé de fibres métalliques ne présente aucun désordre particulier qui pourrait être lié à l'absence de treillis soudé. Aucune évolution anormale n'a été constatée.

Chapitre 3

Comment conduire une inspection détaillée

1

3.1. Comment préparer l'inspection

Le développement qui suit peut s'appliquer à tous les types de tunnels (routiers, ferroviaires, canaux).

3.1.1. Programmation

La périodicité normale des inspections détaillées des tunnels du réseau routier national est définie dans le fascicule 40 de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Elle est rappelée au [chapitre 4](#) du présent guide.

La période d'intervention proprement dite 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 possibilités de fermer le tube à la circulation pendant l'inspection sont à examiner de très près.

3.1.2. 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 et approfondi des archives ou documents qui lui seront communiqués (méthodes de construction, réparations, inspections antérieures, surveillances particulières, mesures et constats de toutes natures, synthèses ou monographies).

Une partition structurelle de l'ouvrage est progressivement élaborée, reposant sur la géologie, le soutènement, l'étanchéité, les revêtements. Il est déjà possible à ce stade précoce de cerner les zones qui ont posé problème à la construction et que l'inspecteur doit considérer comme des **zones singulières**, qui devront faire l'objet d'une attention particulière lors de l'inspection.

Dans le cas d'un tunnel neuf relativement complexe, dont le dossier d'ouvrage n'est pas encore constitué lors de l'inspection détaillée initiale, une visite préliminaire peut s'avérer nécessaire afin de rencontrer les responsables, 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 oeuvre ;
- d'intégrer les contraintes de sécurité imposées par l'exploitant ;
- 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 (marchés, plans, décomptes), ainsi que les bilans annuels d'évènements. Ceux-ci peuvent alerter sur 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.

Dans tous les cas, le rapport de l'inspection précédente doit être analysé précisément au préalable.

3.1.3. Travaux préparatoires

Dévolus à l'inspecteur

Les documents disponibles lui permettent d'une part d'élaborer les fonds de plans précis destinés au levé de voûte, d'autre part de définir les tronçons de tunnel homogènes en termes de structure.

Ces deux tâches sont détaillées dans les [annexes 4](#) ([Partition d'un tunnel p. 54](#)) et [5](#) ([Codification des levés d'intrados p. 56](#)).

Dévolus au gestionnaire

Le gestionnaire doit s'assurer de la présence du **marquage décamétrique** indispensable du tunnel (et des ouvrages annexes s'il y a lieu), et sinon demander sa mise en place (ou son rafraîchissement) avant l'inspection.

2

3

4

5

A

Le principe du marquage est expliqué dans l'annexe 6 (▶ Marquage d'un tunnel p. 60 ▶)

Il doit faciliter le libre accès à toutes les parties de l'ouvrage concernées par l'inspection. Aucune intervention lourde d'entretien ou de lavage ne doit être programmée en même temps que l'inspection détaillée périodique.

3.2. 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 : plate-forme et nacelle sur wagon spécialisé (tunnels ferroviaires), barge équipée d'échafaudage (tunnels canaux).

3.2.1. Le travail de terrain

▶ Les moyens

Certaines parties d'ouvrages sont d'accès et de parcours difficiles (gainés surbaissés, puits, espaces annulaires entre voûtes, parements décalés). Si la surveillance continue y soupçonne des désordres, le gestionnaire doit mettre à disposition des inspecteurs les moyens nécessaires à un examen de qualité. Dans les cas où la surveillance continue et les contrôles annuels ne mettent pas en évidence de dysfonctionnement, on peut repousser leur examen exhaustif à l'inspection suivante.

L'examen des espaces non visitables fait appel à des techniques spéciales (exemple : vidéo-endoscopie de réseaux de drainage ou d'assainissement en vue d'évaluer leur engorgement ou leur rupture). Ces opérations relativement lourdes sont laissées à l'initiative du gestionnaire, éventuellement sur proposition de l'équipe d'inspection.

▶ Les outils

«UNE NACELLE, BEAUCOUP DE LUMIÈRE ET UN MARTEAU»

L'éclairage installé dans les tunnels est généralement insuffisant pour permettre de bonnes observations. Il est donc indispensable de se munir d'un éclairage d'appoint le plus puissant possible. Celui-ci doit permettre d'illuminer une assez grande partie de voûte ; 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 2 ou 3 projecteurs basse tension (12 ou 24 V), le tout monté sur un chariot léger démontable.

Dans les gaines de ventilation qui sont des espaces relativement exigus, l'emploi d'un moteur thermique peut être malaisé et source de pollution. Il est donc fréquent que l'examen se fasse uniquement à l'aide d'éclairage individuel (lampes frontales et torches).



Chariot d'inspection démontable



Camion nacelle du CETU

Lorsque l'examen s'effectue depuis une nacelle, il est conseillé de disposer des projecteurs d'ambiance assez éloignés du poste d'observation, et un projecteur orientable à côté de l'inspecteur, le tout alimenté par les batteries de l'engin.

La nacelle (terme impropre pour « élévateur de personnel ») est indispensable car il faut aller au contact de la partie supérieure de la voûte et ne pas se contenter de l'examiner depuis le bas.

1

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, « en recherche » des désordres. Il est donc indispensable que l'engin puisse se déplacer lentement en position dépliée.

Suivant la standardisation adoptée par les organismes de contrôle réunis au sein du COPREC-AT, il existe trois types principaux d'élévateurs (l'appellation « plate-forme élévatrice mobile de personnel » sera abrégée en PEMP) :

- **type P1** : PEMP posée sur véhicule porteur et utilisée à poste fixe (stabilisateurs au sol). La flèche peut être de type « compas » ou « télescopique ». Le porteur ne peut rouler que si les bras sont repliés ;
- **type P2** : PEMP posée sur véhicule porteur, pouvant se déplacer avec la nacelle (panier) ou la plate-forme en position élevée. La conduite du porteur n'est pas assurée par l'agent situé en nacelle. La réglementation française s'est durcie concernant ce type d'appareil.

Un appareil de type P2 et agréé CE doit comporter un dispositif d'arrêt d'urgence en nacelle, un asservissement vitesse de translation/élévation et une vitesse limitée à 2,5 km/h ; une liaison de communication est requise entre le poste haut et la cabine (Réf: décret 47-1592; NFE 52610 (pour P2); circulaire n° TE 16/73);

- **type P3** : PEMP posée sur châssis ou base automotrice dont le déplacement en translation peut être commandé depuis la plate-forme ou la nacelle, quelle que soit sa position en élévation. On distingue les plates-formes automotrices à ciseaux qui ne peuvent s'élever qu'à la verticale de leur base, et les nacelles automotrices à tourelle et à bras articulés ou télescopiques qui permettent par rotation de balayer une largeur de voûte plus étendue.

2

L'examen des têtes nécessite un déport latéral qui n'est possible qu'avec les engins à tourelle. Enfin, une hauteur de travail maximale d'une dizaine de mètres est suffisante dans la quasi totalité des cas.

Le type P1 ne convient pas au travail d'inspection.

Le type P2 est le mieux adapté, car il peut circuler sur la route comme un véhicule normal. Le CETU possède son propre véhicule de type P2 spécialement conçu pour les inspections de tunnels.

Le type P3 se trouve couramment en location en toute région. Il nécessite un conducteur à coté de l'inspecteur, afin que ce dernier se concentre sur l'observation et non sur le pilotage. L'énergie thermique (diesel) offre une meilleure autonomie que l'énergie électrique. L'inconvénient majeur de ce type d'engin réside dans le fait qu'il doit être livré sur chaque tunnel à inspecter à l'aide d'un camion porte-char. Enfin, la fixation d'un éclairage performant est difficile sur la plupart des modèles.

3

Le marteau : cet outil indispensable permet de sonder n'importe quelle roche ou matériau de revêtement. Le martelage met en évidence des désordres non décelables à l'œil nu (zones sonnantes creux, vides, défauts de compacité, dureté des joints, etc.). 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, et doit devenir un réflexe.

4



Types de marteaux conseillés

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.

D'autres techniques existent, plus sophistiquées, mais dont la lourdeur de mise en œuvre les destine à des reconnaissances complémentaires sur des problèmes soupçonnés au cours de l'inspection.

5

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. Le choix du modèle est affaire personnelle ; cependant les marteaux de géologue sont recommandés, car ils comportent une pique, et leur masse est suffisante pour mettre en vibration des revêtements amincis (au moins 750 g).

A

Autres outils :

Le ruban de mesure est un outil très important qui permet de se repérer dans un tunnel ne comportant encore aucun marquage ou de mesurer certaines dimensions de parties d'ouvrage ; pour limiter les erreurs cumulées faites lors du déplacement du ruban, une longueur de 50 m est recommandée. Les appareils de type odomètre ou topo-fil sont à proscrire, car imprécis.

L'appareil photo (de type reflex) associé à un flash puissant est indispensable. On utilisera un objectif grand angle de 28 ou 24 mm de focale afin de saisir une assez grande zone quand il y a peu de recul. Le flash doit avoir un nombre guide égal ou supérieur à 40 car de nombreux parements sales ou encroûtés réfléchissent peu la lumière. Les appareils numériques de gamme moyenne sont peu performants dans le cas de photos d'ambiance (flash trop faible) mais permettent en revanche de multiplier les photos de détails pour un moindre coût.



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, réglette transparente pour l'évaluation des ouvertures de fissures, pieds à coulisse pour mesurer les fissuromètres installés, appareils simples détecteurs d'armatures dans les bétons. La liste n'est pas limitative et dépend du contexte, mais ces outils doivent rester légers, maniables et d'emploi rapide.

L'emploi de perforateurs ou d'outils plus lourds n'est pas nécessaire dans le cadre d'une inspection, sauf si l'on veut bénéficier de l'organisation mise en place pour faire l'investigation d'une zone ponctuelle déjà clairement reconnue ; dans ce cas, le travail sera effectué par du personnel en parallèle à l'inspection. Cela fait plus souvent partie des reconnaissances complémentaires que l'on décide en cas de doute sur une pathologie.

Le support de levé : il s'agit essentiellement du levé de voûte que l'inspecteur conserve en main et sur lequel il note et dessine tous les désordres constatés. C'est le document principal du rapport d'inspection.

▶ Les méthodes d'inspection

■ La méthode d'inspection classique

L'organisation du travail en tunnel

L'inspection d'une voûte se fait en deux passages, le premier à pied, le second en nacelle.

Il est préférable de débiter l'inspection 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 aussi plus facile de repérer précisément depuis le sol un désordre situé en calotte.

Le travail en nacelle permettra ensuite d'ausculter la voûte, de caractériser ou préciser les désordres déjà repérés depuis le bas, mais aussi d'en découvrir d'autres.

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 pas possible, le travail s'effectue sous circulation, sur une voie neutralisée et balisée. La demi voûte sera donc inspectée en totalité (sol et nacelle) avant de procéder de même sur l'autre voie.

Dans les tunnels comportant des gaines de ventilation, l'équipe d'inspection peut se scinder et travailler parallèlement sur chaque partie d'ouvrage.

L'examen des têtes et de leurs abords immédiats ne doit pas être oublié. Il ne peut se faire qu'avec une nacelle à déport latéral.

La démarche de l'inspecteur

«OBSERVER AVEC CURIOSITÉ ET DÉCRIRE AVEC PRÉCISION»

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 ainsi qu'en extérieur. Il concentre néanmoins son attention sur les points signalés par les agents des services locaux, et 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, noter tout indice lui permettant d'appréhender la situation et d'ébaucher un 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 ensuite des **troussons 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.

Dans les tunnels neufs, une bonne connaissance des méthodes de construction conduira à un diagnostic affiné (exemple: une épaufrure systématique du béton liée aux opérations de décoffrage est un défaut et non un désordre

Terminologie p. 8).

Pour les sections ou tunnels non revêtus, le recours à une personne compétente en géologie est requis.

De nombreuses photographies, d'ensemble et de détail, sont indispensables pour compléter les relevés et figer la mémoire.

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

■ Méthode complémentaire d'inspection

Relevés d'intrados en continu par scanner

Cette technique permet d'acquérir une image de moyenne à haute résolution à l'aide d'un scanner 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).

Trois types de données peuvent être acquises (généralement en plusieurs passages de l'appareil): image lumière visible, image infrarouge (thermographie passive), profilométrie en continu.

Les données brutes d'acquisition font l'objet d'un traitement informatique lourd, effectué par le prestataire, qui permet de fournir une image à une échelle précise. Suivant la résolution choisie (de 3 à 10 mm), la taille du fichier final peut atteindre des dimensions considérables (0,5 à 3 Giga-octets par km).



Exemple d'image scanner en lumière visible. Tunnel des Monts (ouverture 12 m).
Résolution 10 000 pixels par ligne de balayage
(soit une maille de 4 mm sur le parement)

Points positifs :

- le scanner permet d'observer un intrados dans sa globalité, ce qui était impossible auparavant ;
- l'image permet de faire apparaître de nouvelles « zones » passées jusque là 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 ;
- relevés manuels et photos classiques permettent rarement à un gestionnaire de se faire une idée exacte de l'aspect de son tunnel. L'image scanner lui sera d'une grande aide en cas de tunnels à 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 ;
- pour l'inspecteur, posséder une telle image permet de mieux interpréter (avec la totalité des objets), voire de revenir examiner un détail plus tard.

Points négatifs :

- sur le terrain, l'esprit du levé a été jusqu'à présent de **sélectionner** et de dessiner, parmi la multitude d'objets visibles, ceux qui sont **représentatifs d'un désordre** avéré, probable, prévisible ;
- une image, aussi détaillée soit-elle, ne remplace pas un levé interprété, même imprécis. On peut aller plus loin en disant que certains désordres graves sont invisibles à l'image, soit par définition (zones sonnantes le creux, exfoliations débutantes) soit parce que noyés dans la multitude des objets qui apparaissent ;
- le report des observations sur l'image imprimée conduit parfois à rendre difficilement lisible le document surchargé ;
- le coût reste encore élevé (de 10 à 20 k€ par km selon le prestataire, la longueur et la localisation de l'ouvrage). On a donc intérêt à grouper le maximum de tunnels dans une même opération.

En conclusion, ces images constituent une aide très précieuse pour la visualisation objective d'un intrados, mais aussi pour déceler des objets ou des désordres cachés situés à l'extrados (thermographie). Elles sont d'un grand intérêt en particulier pour les tunnels longs et anciens dont les intrados complexes, mal restitués par les relevés manuels, sont difficiles à appréhender globalement. Si des images sont acquises périodiquement, il devient alors possible d'estimer des évolutions de manière beaucoup plus précise.

Mais elles ne peuvent pas (pour l'instant) remplacer l'examen visuel « au contact » et le levé d'intrados comme document de base d'une inspection détaillée.

■ Méthode alternative au levé manuel

Cette méthode se distingue de la méthode classique par l'utilisation, sur le terrain, d'une tablette graphique remplaçant les fonds de plan papier.

Cette tablette s'apparente à un ordinateur portable sur l'écran duquel l'inspecteur dessine directement son relevé de désordres à l'aide d'un logiciel de DAO adapté. La précision et la qualité du levé sont indépendants du système et ne dépendent que de l'inspecteur. L'intérêt d'un tel outil est d'être intégré à un logiciel de gestion complète d'un parc d'ouvrages, produit qui est commercialisé sous licence. En ce qui concerne les seules opérations de levé en tunnel, le gain en temps et en souplesse ne semble pas décisif.

3.2.2. Le travail de bureau

Ce travail est de la responsabilité de l'inspecteur et consiste en la mise au net de ses relevés de voûte (actuellement à l'aide d'outils de DAO) et la rédaction du rapport d'inspection ([Cadre type de rapport d'inspection détaillée p. 65](#)).

Le rapport d'inspection ([Éléments d'un cahier des charges type d'inspection détaillée p. 44](#) et [Cadre type de rapport d'inspection détaillée p. 65](#))

Le but de ce rapport est de fixer avec le plus de précision possible l'état de l'ouvrage à une date donnée.

Il présente le pré-diagnostic en faisant apparaître clairement les différents tronçons 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, mais le projet de réparation doit faire l'objet d'une étude distincte, à mener dans une étape suivante. De même, si les relevés d'intrados peuvent être utilisés pour établir l'avant-métré sommaire des travaux, ils ne doivent pas être établis dans cet esprit. Il est préférable de réaliser cet avant-métré lors d'une autre phase de l'étude, qui est celle de la réparation, une fois que les principes de celle-ci ont été arrêtés. Dans les cas plus complexes où des incertitudes demeurent sur des aspects délicats, le rapport peut proposer des mesures ou des investigations complémentaires à réaliser. Les reconnaissances, à définir avec le maître d'ouvrage, permettront de progresser vers le diagnostic final.

Dans certains cas, le rapport peut également proposer des mesures sécuritaires ou conservatoires immédiates.

L'évaluation IQOA

La démarche IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) a été initiée en 1994 par la Direction des Routes du ministère de l'Équipement. Il s'agit d'un outil destiné à évaluer l'état du patrimoine et à définir une politique de gestion et d'entretien. Cette démarche a été étendue aux tunnels non concédés de l'État en 1996 et son application confiée au CETU.

D'autres outils similaires sont actuellement en service pour ce qui concerne les ouvrages gérés par les départements. Les autres maîtres d'ouvrages (SNCF, RATP, ...) possèdent leurs propres outils de gestion.

Le développement qui suit ne constitue pas une règle applicable par tous. Il décrit simplement la procédure appliquée aux tunnels du réseau national.

L'évaluation IQOA des tunnels est faite uniquement à l'occasion des inspections détaillées. Elle est proposée par les inspecteurs pour chacun des tronçons de l'ouvrage. Ces tronçons, qui se distinguent lors de l'inspection, peuvent ne pas coïncider avec les zones singulières suspectées lors de l'étude des archives de construction. Ce nouveau découpage viendra compléter le synoptique de structure.

La procédure d'évaluation ([L'évaluation IQOA p. 62](#))

Elle repose sur une grille définissant les classes IQOA pour les tunnels.

Chaque tronçon est affecté d'une note IQOA-génie civil spécifique. La mention «S» peut être attribuée à l'une quelconque des classes s'il y a un danger pour l'utilisateur.

Cette évaluation IQOA est résumée dans une fiche d'évaluation du tunnel, attirant aussi l'attention sur les points particuliers. Cette fiche est jointe au rapport d'inspection et actualisée (si besoin est) lors de chaque inspection détaillée.

L'annexe 7 ([L'évaluation IQOA p. 62](#)) fournit un tableau donnant la plage d'évaluation possible de chaque désordre décrit dans les fiches.

Avant la fin de la visite a lieu sur place une réunion «à chaud» avec le gestionnaire et le représentant du maître d'ouvrage au cours de laquelle le responsable de l'inspection présente les désordres et justifie les cotations proposées, tout particulièrement sur certains tronçons déclarés sensibles et relevant d'une attention particulière dans le cadre de la surveillance continue.

Cette réunion est souhaitable dans tous les cas, mais elle est indispensable dès lors qu'il existe dans l'ouvrage au moins un tronçon noté 2E, 3, 3U ou affecté de la mention S.

L'évaluation IQOA est validée par le représentant du maître d'ouvrage.

1

2

3

4

5

A

Chapitre 4

Aspect réglementaire

Tous les ouvrages d'art français doivent faire l'objet d'une surveillance et d'un entretien.

Pour le réseau routier national (Routes Nationales et Autoroutes, concédées ou non), ces actions sont réglementées par l'**Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) du 19 octobre 1979**. La première partie de cette instruction établit les dispositions applicables à tous les ouvrages; elle a fait l'objet d'une **révision applicable à compter du 1^{er} janvier 1996**, intégrant en particulier la démarche IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) dans les modalités de surveillance des ouvrages d'art.

La deuxième partie est constituée d'une vingtaine de fascicules dont la révision est faite ou en cours.

Les fascicules suivants, qui concernent l'ensemble des ouvrages d'art, apportent des informations utiles pour les tunnels :

- **Fascicule 01** Dossier d'ouvrage
- **Fascicule 02** Généralités sur la surveillance
- **Fascicule 03** Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde
- **Fascicule 04** Surveillance topométrique
- **Fascicule 20** Zone d'influence, accès, abords

Le **Fascicule 40**, lui, traite exclusivement des particularités des tunnels et des tranchées couvertes.

La parution de la version révisée est prévue en 2005.



L'instruction technique distingue différents aspects de la surveillance (**Logigramme d'organisation de la surveillance p. 43**) :

- **la surveillance continue** : pour les tunnels, elle est formalisée sous la forme du « relevé permanent d'évènements » alimenté par les observations des patrouilleurs ou autres agents passant dans le tunnel. Elle doit s'appliquer aux équipements mais aussi au génie civil (*exemple : apparition de fissures, chutes de pierres périodiques ou localisées aux mêmes endroits en tunnel non revêtu, venue d'eau brutale ou extensive, etc.*) ;
- **le contrôle annuel** : il fait le bilan des évènements constatés dans l'année ; cette synthèse doit faire apparaître si certains d'entre eux sont répétitifs ou très localisés, ce qui peut être un indice d'évolution des structures. Ce bilan est complété par un examen rapide des têtes, ouvrages annexes, parties non circulées et points particuliers éventuellement signalés par une inspection antérieure. Ce bilan riche d'enseignements est archivé dans le dossier d'ouvrage.
- **l'inspection détaillée**, objet du présent guide, est l'étape la plus élaborée de la surveillance organisée que le gestionnaire doit mettre en oeuvre afin de suivre l'évolution de ses ouvrages. Cet examen visuel approfondi est le point de départ de la bonne connaissance d'un tunnel.

Ce qui suit rappelle les principales dispositions de l'instruction technique. Ces dispositions peuvent être reprises ou adaptées par les maîtres d'ouvrages d'autres types de tunnels non soumis à l'instruction technique, en fonction de leurs spécificités (tunnels ferroviaires, tunnels canaux, tunnels routiers hors réseau national).

4.1. Les ouvrages concernés

Tous les tunnels du réseau routier national doivent faire l'objet d'une **inspection détaillée initiale (IDI)** à la fin de la construction, et si possible avant sa mise en exploitation afin de bénéficier d'un ouvrage libre des contraintes de trafic. Une IDI est également recommandée après des travaux majeurs de remise en état.

Ce type d'inspection définit un état de référence pour les **inspections détaillées périodiques** suivantes (IDP).

4.2. La périodicité

Elle est fixée par le Maître d'Ouvrage.

La périodicité normale est de 6 ans.

Dans le cas d'un tunnel neuf, la première IDP est effectuée 3 ans après l'IDI. Cette disposition permet de juger plus rapidement d'une évolution éventuellement anormale de l'ouvrage. La deuxième IDP est programmée au plus tard 6 ans après la première.

À ce moment-là, la bonne connaissance du comportement de l'ouvrage permet au maître d'ouvrage, soit d'allonger la périodicité des IDP à 9 ans (ouvrage très robuste), soit de la réduire à 3 ans (voire 1 an), sur la totalité du tunnel ou sur certains tronçons, si les désordres constatés sont évolutifs. Ces tronçons sont qualifiés de «sensibles» ([Le pré-diagnostic p. 21](#)).

Si la surveillance continue de l'ouvrage perçoit une évolution jugée alarmante entre deux inspections détaillées, le gestionnaire du tunnel peut à tout moment alerter le maître d'ouvrage qui déclenchera alors une **inspection détaillée exceptionnelle** (totale ou partielle).

4.3. Les intervenants et leur rôle

Le **maître d'ouvrage** est responsable du déclenchement et de la réalisation des inspections détaillées périodiques dont la programmation est établie chaque année par la cellule départementale d'ouvrages d'art (CDOA), en liaison avec la subdivision en charge de l'exploitation.

Dans le cas des tunnels neufs, l'IDI est effectuée à l'initiative du **service constructeur**, avec la participation du futur gestionnaire; elle a lieu dans la mesure du possible avant la mise en service.

Les inspections détaillées doivent être réalisées par des **services spécialisés** en pathologie des tunnels (Bureaux d'études spécialisés, CETU pour le réseau national non concédé).

Dans le cas le plus général, le choix du service spécialisé se fait par consultation sur la base d'un cahier des charges. Les offres doivent faire apparaître la qualification des candidats pour ce type de prestation appliquée aux tunnels.

L'**annexe 2** ([Éléments d'un cahier des charges type d'inspection détaillée p. 44](#)) présente un exemple de CCTP type d'inspection détaillée de tunnel.

Avant le début des inspections, le maître d'ouvrage doit mettre à la disposition des inspecteurs tous les documents nécessaires à la bonne compréhension de l'ouvrage (dossier d'ouvrage, dossiers des réparations, dossiers de mesures, bilans annuels des événements).

Le **responsable de l'inspection** définit avec le gestionnaire le calendrier et ses besoins spécifiques pour l'inspection. Il rédige ensuite un rapport d'inspection détaillée faisant la synthèse du constat effectué et de la connaissance qu'il a dégagée de l'étude des archives.

La **subdivision territoriale gestionnaire** du tunnel est responsable de l'organisation matérielle de l'inspection. Elle a la charge de la restriction de circulation, de la signalisation, du balisage du chantier ainsi que de sa surveillance pendant l'inspection. Elle doit transmettre aux inspecteurs les informations issues de la surveillance continue (relevé permanent d'évènements), les constats de contrôles annuels, sur lesquels figurent les interventions réalisées.

4.4. Les conditions de sécurité

Les inspections détaillées nécessitent obligatoirement l'emploi d'une nacelle (ou élévateur de personnel). Ces engins doivent être habilités par un organisme de contrôle agréé.

Les inspecteurs ou agents d'inspection appelés à manœuvrer ces engins doivent être titulaires d'une **habilitation spécifique et personnelle** délivrée par leur employeur.

Les détails sont donnés dans l'**annexe 3** ([Conditions de sécurité p. 50](#)).

Documentation

1

Quelques sites internet utiles

- Association française des travaux en souterrain (AFTES) <http://www.aftes.asso.fr/>
- Association internationale des travaux en souterrain (AITES-ITA) <http://www.ita-aites.org/>
- Centre d'études des tunnels (CETU) <http://www.equipement.gouv.fr/cetu/>
- Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) <http://www.lcpc.fr/>
- Ministère de l'Équipement, des transports, de l'aménagement du territoire, du tourisme et de la mer <http://www.equipement.gouv.fr/>
- Normalisation française <http://www.boutique.afnor.fr/>
- Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA) <http://www.setra.fr/>

2

Recommandations, guides, normes

- AFNOR, *Classification des environnements agressifs*, AFNOR, norme P 18-011, juin 1992.
- CETU, *Dossier pilote des Tunnels*, partie Génie Civil, CETU, juillet 1998.
- CETU, *Guide du gestionnaire de tunnel routier*, CETU, novembre 1982.

3

Généralités

- BOUVARD-LECOANET A., COLOMBET G., ESTEULLE F., *Ouvrages souterrains - Conception, réalisation, entretien*, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1992, 271 p.
- KURTZ J.P., *Dictionnaire du génie civil (Français-Anglais)*, PUF, Paris, 1997, 1 600 p. *Présent dans toutes les cellules Ouvrage d'Art.*
- LOTVOET A., *Technologie des maçonneries*, septembre 1981, 59 p.
- REVERDY G., *Petite histoire des tunnels - Culture technique*, Génie Civil, n° 26, 1992, p. 20-30.
- SNCF, *Notice Générale EF9C4 n° 3, Construction des tunnels anciens en maçonnerie*, 31 mars 1975, 73 p.
- SZECHY K., *Traité de construction des tunnels*, Dunod, Paris, 1970.

4

Désordres, pathologies

▶ Non revêtu, géologie

- AMBERG W., RUSSO M., *Seismic design of underground structures, the Bolu tunnel*, AITES-ITA World Tunnel Congress, Milan, juin 2001, pp. 137-145. *400 m du tunnel en chantier détruits lors du séisme de Düzce (novembre 1999).*
- FOUCAUT A., RAOULT J.F., *Dictionnaire de géologie*, Éd. Masson, Paris, 4^e édition 1996, 347 p.
- PEJON O. J., LE ROUX A., MORIN D., PLATRET G., *Rôle de la minéralogie et des textures dans les mécanismes de gonflement des marnes, colloque MAGI' 50*, École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 21-22 sept. 1999.
- ROBERT A., *Tunnels non revêtus, défauts caractéristiques, étude des instabilités*, Formation continue ENPC «Pathologie et réparation des tunnels anciens» Lyon, octobre 1994, 11 p.
- ROBERT A., FABRE D., *Rapport sur le gonflement*, Comité Français de Mécanique des Roches, groupe de travail «Ruptures en souterrain», mai 1987.

▶ Maçonneries

- DELOYE F.-X., *Perte de résistance des mortiers, des bétons et des pierres dans les ouvrages et les monuments anciens*, Bulletin LPC n° 175, octobre 1991, pp. 55-58.

5

A

- DELOYE F.-X., LOUARN N., LOOS G., *Exemple d'analyses sur des maçonneries. Cas du tunnel du Puberg*, Bulletin LPC n° 163, octobre 1989, pp. 17-24. *Attaques sulfatiques sur une maçonnerie de grès.*
- GILLAN H., *Vieillessement des matériaux de revêtement (SNCF)*, Formation continue ENPC, Lyon, octobre 1997, 15 p. *L'approche par les causes.*
- MARTINET G., *Grès et mortiers du temple d'Amon à Karnak (Haute-Égypte) – Étude des altérations, aide à la restauration*, LCPC, 1992, 187 p. *Démontre les interactions néfastes entre des pierres poreuses et un mortier de rejointoiement ou de ragréage trop moderne, conduisant à une accélération des désordres.*
- PELLERIN F.M., *Les altérations des maçonneries carbonatées de tunnels ferroviaires anciens*, Thèse ENSM Paris, juin 1978, 232 p. *Les aspects physiques, chimiques, biologiques des désordres sont analysés de façon très détaillée.*

▶ Bétons

- AGGOUN S., *Étude du comportement du béton coffré non armé vis-à-vis de la fissuration – Application aux revêtements de tunnels*, Thèse INSA Lyon, 1992, 221 p. *Tunnels neufs.*
- AÏTCIN P.C. (Université de Sherbrooke - Québec), *État de l'art des bétons à hautes performances*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, avril 2001, pp. 19-29.
- BARON J., OLLIVIER J.P., *La durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, 1992, 453 p.
- CHAUSSADENT T., *Analyse des mécanismes de carbonatation du béton*, Actes des Journées techniques AFPC-AFREM, Toulouse, décembre 1997, Éd. LMDC-INSAToulouse, mars 1998, pp. 75-86.
- CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., *Apports de la physico-chimie à l'étude de la durabilité des bétons*, Actes des Journées sur la physico-chimie des matériaux et de l'environnement, Lille, 18-19 novembre 1998, 1998, pp. 6-10.
- DELOYE F.-X., *Analyse minéralogique: application aux bétons durcis en liaison avec la pérennité des ouvrages*, Rapport de recherche des LPC n° 83, 56 p.
- DELOYE F.-X., *Utilisation des exsudats comme indicateurs primaires de dégradation des bétons et maçonneries d'ouvrages d'art*, Bulletin de liaison LPC n° 124, mars-avril 1983, pp. 25-30. *Incite à regarder au-delà de l'ouvrage pour en comprendre les désordres.*
- DIVET L., *État des connaissances sur les causes possibles des réactions sulfatiques internes au béton*, Bulletin LPC n° 227, juillet-août 2000, pp. 71-84.
- DIVET L., *Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite*, Thèse CNAM, Paris, mai 2001, 227 p.
- DIVET L., TOUZÉ Ph., *Le diagnostic du béton par analyses chimiques et minéralogiques*, Journées d'études du CEFRACOR sur le diagnostic des ouvrages en béton armé: État - méthodes - précision du vieillissement, 12 et 13 octobre 1998, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, pp. 44-50.
- DRON R., BRIVOT F., CHAUSSADENT T., *Mécanisme de la réaction alcali-silice*, Bulletin des LPC, n° 214, mars-avril 1998, pp. 61-68.
- GRIMALDI G., RAHARINAIVO A., *Vers une stratégie de réparation du béton armé dégradé*, Bulletin des LPC n° 223, décembre 1999, pp. 59-70.
- Guide Technique LPC - *Défauts d'aspect des parements en béton*, LCPC, 1991. *Destiné aux ouvrages d'art courants.*
- LARIVE C., *Quand le béton se met à gonfler*, La Recherche, n° 319, avril 1999, pp. 43-47. *Les enjeux économiques.*
- LE ROUX A., ORSETTI S., *Les réactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés*, Bulletin LPC n° 225, mars-avril 2000, pp. 41-50.
- *Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art*, LCPC, ISSN 1151-1516, février 1999, 42 p. *Aide à la reconnaissance visuelle de l'alcali réaction et des attaques sulfatiques. Comment les gérer.*
- Méthodes d'essai n° 58, *Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons, Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire*, LCPC, février 2002.
- PERA J., DEFFAYET M., CHAPEAU C., *Domaine d'utilisation du béton non armé pour les revêtements de tunnel*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° 103, janvier-février 1991, pp. 9-18.
- REGOURD M., *Corrosion physico-chimique du béton*, Chantiers (Suisse), Vol. 16, n° 9, 1985, pp. 839-843. *Les processus chimiques, les équations, exemples et illustrations.*

▶ Drainage, étanchéité

- AFTES, *Recommandations sur les venues et les pertes d'eau dans les ouvrages souterrains en exploitation*, Tunnels et ouvrages souterrains n° 89, pp. 265-298.

- KIRSCHKE D., The drainage system of the Rennsteig Tunnel – A concept for the future, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, juin 2001, Patron éd., Bologne, pp. 425-432. *Une solution pour diminuer le colmatage systématique des drains par la calcite.*

Diagnostic

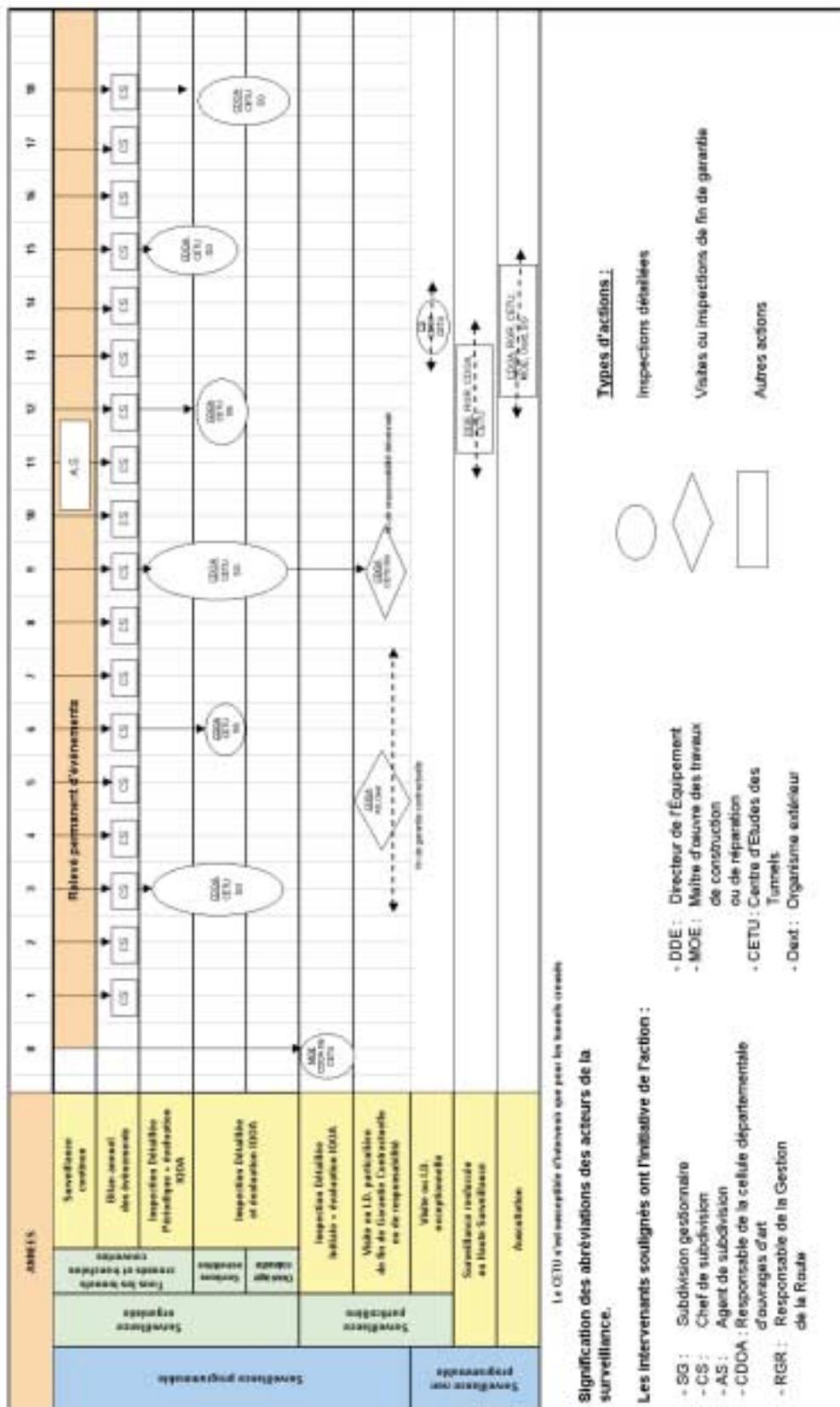
- AFTES – GT 14, *Recommandations relatives aux méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° 131, septembre-octobre 1995, pp. 287-306.
- *Évaluations non destructives pour le génie civil*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial 239, 2003, 173 p.
- POMA A., MAGLI G., PASQUALI M., FLAMIA M.T., *Influenza delle tecniche progettuali e costruttive sulla durabilità del calcestruzzo*, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress, juin 2001, Patron éd., Bologne, pp. 705-719. *Plusieurs formes de fissuration de voûte, interprétées.*

Surveillance, entretien, réparation

- Quelques recommandations AFTES (voir aussi le site Internet):
 - T 14, *Les travaux d'entretien et réparation*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° spécial, novembre 1984, pp. 36-68.
 - T 9, *Les réparations d'étanchéité en souterrain*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° spécial, mai 1988, pp. 79-93.
 - GT 14, *L'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° 146, mars-avril 1998, pp. 103-134.
 - GT 14, *Recommandations pour l'informatisation de l'archivage et de l'exploitation des données pour les tunnels en service*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° 116, septembre 1993, pp. 63-72.
 - GT 20, *Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains*, Tunnels et ouvrages souterrains, n° 164, mars-avril 2001, pp. 68-102.
 - GT 19, *Recommandations sur les techniques d'auscultation*, à paraître.
- Bulletin officiel du ministère des Transports, Fascicule 69 du C.C.T.G., *Travaux en souterrain*, Circulaire n° 82-55 du 17 juin 1982.
- CETU, *Guide de réparation et de réhabilitation des tunnels routiers*, à paraître.
- CETU, *Guide pour la surveillance, l'entretien, la conservation des tunnels routiers*, CETU, mars 1998.
- *Fiabilité des ouvrages de génie civil – Conception et maintenance*, Revue française de génie civil, Volume 6, n° 3, 2002, pp. 319-516. *Outils et méthodes probabilistes pour optimiser les actions d'inspection, de maintenance et de réparation.*
- *Guide Socotec de la maintenance et de la réhabilitation*, tomes 1 et 2, Le Moniteur, Paris, 2002.
- LEBRAS A., RATP, *La régénération des maçonneries en souterrain*, Journées d'Études du CEIFICI, 7 et 8 novembre 1995.
- POINEAU D., LACOMBE J.C., *La méthodologie des expertises et des réparations*, Revue Ouvrage d'Art n° 31, décembre 1998, pp. 14-19.
- *Télé-surveillance des ouvrages d'art et des sites*, Projet national ITELOS, Éd. KIRK, 1994, 442 p.

Annexe 1

Logigramme d'organisation de la surveillance des tunnels



Annexe 2

Éléments d'un cahier des charges type d'une inspection détaillée (ID) de tunnel ou tranchée couverte

A.1. Reconnaissance

À partir du programme d'inspections détaillées défini par le Maître d'Ouvrage, la liste des tunnels devant faire l'objet d'une inspection détaillée (ID) est arrêtée en début d'année par le RGR¹. La CDOA en liaison avec la subdivision doit alors examiner pour chaque type d'ouvrage :

- les sujétions d'intervention :
 - la signalisation et le personnel de sécurité nécessaires,
 - le nettoyage préalable des abords des têtes, des accès et des parements de l'ouvrage,
 - la nécessité d'aviser les autres gestionnaires (ouvrages ou voies riveraines) ;
- la liste des documents disponibles et leur emplacement ;
- la composition de l'équipe d'inspection. Il est rappelé que :
 - l'équipe de constatations doit être dirigée par un agent de niveau technicien supérieur ayant au moins 5 ans d'expérience d'inspection détaillée en tunnel,
 - l'ensemble de l'ID doit être dirigée par un agent qualifié du niveau ingénieur ayant obligatoirement reçu une formation spécialisée dans le domaine des tunnels, qui a la responsabilité de la rédaction du rapport,
 - l'équipe d'inspection d'un tunnel doit comporter en outre un agent pouvant attester d'une solide formation en géologie.

La CDOA doit faire appel, soit à un organisme spécialisé du réseau scientifique et technique du ministère de l'Équipement (RST), soit à un bureau d'études. Dans les deux cas, les prestataires doivent justifier pour leur personnel une expérience et des compétences définies ci-dessus. Dans le deuxième cas, il doit être demandé aux candidats, lors de la consultation, de fournir à l'appui de leurs offres les curriculum vitae de l'équipe d'inspection qui sera réellement sur le terrain et du directeur de l'équipe.

La CDOA et la subdivision doivent définir d'un commun accord avec l'organisme les moyens d'accès nécessaires et le calendrier des interventions. Elle doit alors faire, avec l'équipe d'inspection de cet organisme, une pré visite de chaque ouvrage en fonction de sa complexité. Au cours de cette pré visite les points à voir seront listés en détail, ainsi que la liste des mesures à réaliser.

A.2. Préparation de l'intervention

La CDOA, en liaison avec la subdivision, effectue la programmation des moyens (nacelle, échafaudage...) et définit les dates d'intervention. Elle s'assure que le marquage décimétrique a été fait ([☛ Marquage d'un tunnel p. 60](#)). Dans l'hypothèse contraire, elle le fait réaliser lors d'une intervention préalable.

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

- planifier l'intervention (demande des sujétions d'intervention au RGR ou son représentant...);
- récupérer le dossier d'ouvrage (y compris les résultats de la surveillance antérieure) ;
- analyser le dossier d'ouvrage, et attester qu'elle en a bien pris connaissance, et plus particulièrement de l'historique de l'ouvrage ;
- préparer les fonds de plans des levés d'intrados.

1. Les abréviations RGR, CDOA, etc. sont définis dans le logigramme de l'annexe 1.

A.3. Intervention in-situ

Elle comprend pour l'équipe d'intervention :

- la mise en place des moyens programmés par le RGR (nacelle,...) et par le responsable de l'ID, du matériel complémentaire nécessaire à la réalisation des inspections ;
- la vérification des conditions de sécurité de l'intervention définies par le fascicule général de sécurité rédigé par le RGR ou son représentant ([Conditions de sécurité p. 50](#)) ;
- l'examen visuel rapproché « à portée de main » des parties accessibles avec les moyens définis lors de la reconnaissance préalable avec relevé exhaustif des désordres. Il est complété par quelques mesures simples (distances, longueurs, ouvertures, sondages au marteau, prélèvements...);
- le report systématique des désordres sur les levés d'intrados suivant une codification telle qu'ils soient interprétables sans ambiguïté par toute personne appelée à les consulter en vue d'une intervention, quelle qu'en soit la nature. Cette codification est donnée dans [l'annexe 5 \(Conception et codification des levés d'intrados p. 56 \)](#) ;
- la visite éventuelle de la surface située au-dessus des tunnels à faible couverture de terrain ;
- le responsable de l'ID d'un tunnel devra utiliser les nomenclatures des parties d'ouvrages, les catalogues de désordres et les dossiers pilotes édités par l'AFTES ou le CETU pour la description des parties d'ouvrage, leur appellation et la caractérisation des désordres ;
- la prise de clichés susceptibles d'aider à la compréhension des structures et des désordres.

La commande doit spécifier l'obligation pour l'organisme (RST, ou B.E.) qui exécute l'inspection détaillée d'établir un PAQ qui contiendra :

- un document d'organisation générale qui permettra à la CDOA de s'assurer de la compétence requise des intervenants et des modalités du contrôle interne à l'organisme permettant le respect de la commande ;
- une fiche de procédures d'exécution.

Le responsable de l'ID sur le terrain doit prendre, en tant que de besoin, l'initiative de proposer au chef de la subdivision d'exploitation les investigations complémentaires qui lui paraîtraient indispensables à l'interprétation de ses constatations. Le rapport devra justifier le bien fondé de ces interventions.

A.4. Rédaction du rapport d'inspection détaillée

Ce rapport sera conforme au modèle de cadre de [l'annexe 8 \(Cadre type de rapport d'inspection détaillée p. 65 \)](#).

Dans le cas où l'ID d'un tunnel a été réalisée par un B.E., le rapport doit faire l'objet d'un contrôle extérieur, s'appuyant sur le réseau technique. De même la proposition d'évaluation IQOA ([L'évaluation IQOA p. 62](#)) doit être vérifiée par ce contrôle extérieur.

A.5. Réunion de synthèse

Avant la fin de la visite a lieu sur place une réunion avec la subdivision d'exploitation et la CDOA au cours de laquelle les agents en charge de l'ID présentent les désordres et justifient la cotation proposée. Cette réunion est souhaitable dans tous les cas, mais elle est indispensable dès lors que l'ouvrage est susceptible d'être coté 2E, 3, 3U ou affecté de la mention S, c'est-à-dire lorsque des actions d'entretien ou de réparation doivent être lancées à l'issue de l'inspection.

A.6. Exemple d'application à un tunnel revêtu (béton coffré)

INSPECTION DETAILLEE DU TUNNEL DE XXXXXXXXXXXX

Cahier des charges

Introduction

Les éléments donnés ci-après sont destinés à être utilisés dans le cadre de la consultation de bureaux d'études pour la réalisation de l'inspection détaillée du tunnel de :

Ils ont pour but de préciser les moyens à mettre en oeuvre et les opérations à mener pour réaliser une inspection qui non seulement soit conforme à la réglementation, mais surtout soit adaptée à la mise en évidence de toutes les particularités de l'ouvrage utiles pour caractériser son état, et permettant de suivre son évolution.

Description de l'ouvrage

L'inspection porte sur l'ensemble de l'ouvrage d'art tunnel assurant la circulation dans les 2 sens qui est constitué des éléments suivants :

➤ *Lister ces éléments*

Elle portera, outre les parties circulées, sur les puits, gaines de ventilation, et sur les têtes.

Description des travaux

La consultation a pour objet l'inspection détaillée du tunnel de : xxxxxxxx, au sens de l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA).

Les modalités de l'inspection détaillée d'un tunnel sont fournies dans le fascicule 40, qui constitue la 2ème partie de l'instruction technique.

Les observations à faire concernent le génie civil et portent sur toutes les parties citées dans la description de l'ouvrage qui doivent faire l'objet d'un examen rapproché. Pour les réseaux d'assainissement et de drainage, elles ne portent que sur leurs parties accessibles par les niches ou les tampons.

Pour le tunnel de xxxxxxxxxx , les constatations portent essentiellement sur les dégradations pouvant affecter un revêtement en béton, armé ou non armé, à savoir (liste non exhaustive) :

- Les fissures. On notera leur extension, leurs ouvertures exprimées en millimètres, les désaffleurements éventuels avec le sens du décalage.
- Les épaufrures.
- Les ragréages.
- Les hétérogénéités du béton, lorsqu'elles sont importantes : nids de cailloux, reprises de bétonnage avec ségrégation, bullage intense...
- Les aciers apparents, ou dont le "fantôme" visible indique la proximité de l'intrados.
- Les zones humides et les suintements.
- Les concrétions.
- Les zones sonnant le creux : La mise en évidence de ces zones est très importante. Elle se fait à l'aide d'un marteau et permet de déceler des défauts, voire des désordres cachés. Le martelage doit concerner la totalité de l'intrados, avec un maillage de 1mx1m environ ; il est renforcé dans la partie supérieure de la voûte et au niveau des joints de bétonnage.
- Les détails de structure de l'ouvrage, tels que les niches, puits, by-pass, ainsi que les équipements (PMV, etc.) sont à reporter de façon à faciliter le repérage.

Moyens

Personnel

L'ITSEOA indique que l'inspection détaillée doit être conduite par un agent qualifié du niveau d'ingénieur ayant obligatoirement reçu une formation spécialisée.

L'équipe est complétée par un technicien supérieur qualifié dans la surveillance et la réalisation des inspections détaillées, par un ou plusieurs aides - en particulier pour le martelage manuel - et par le chauffeur du camion-nacelle. Les noms et qualités des personnels seront précisés dans l'offre.

D'après les données issues de la dernière inspection détaillée de ce tunnel, la durée de l'inspection peut être estimée à X journées de travail effectif pour l'équipe.

Matériel

Le matériel peut être, selon les termes du marché :

- soit à la charge du titulaire du marché
- soit fourni par le Maître d'œuvre

Dans tous les cas, les moyens d'observations (camion-nacelle, éclairage) doivent être utilisés conformément aux spécifications du constructeur et aux recommandations des organismes de contrôle, et être adapté aux conditions particulières de travail dans ce tunnel.

Il est recommandé d'utiliser un engin muni des dispositifs de sécurité l'autorisant à rouler nacelle déployée. La nacelle doit permettre d'accéder aisément en tout point de la voûte pour avoir « la main sur le béton ».

Les moyens d'éclairage doivent être assez puissants pour permettre une vision parfaite des lieux dans toutes les directions, tant en partie circulée que dans les gaines.

Lorsque le matériel est à la charge du titulaire, le maître d'œuvre doit s'assurer que toutes les vérifications réglementaires ont été réalisées à la diligence du titulaire. En cas d'absence ou d'insuffisance de ces vérifications, il doit interdire l'utilisation du matériel.

Conditions de réalisation de l'inspection

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

Données mises à disposition du prestataire

Seront remis ou communiqués au titulaire dès la passation de la commande :

- Documents synthétiques présentant l'ouvrage, expliquant son mode de construction, avec les plans et profils en travers selon les sections.
- Rapport d'inspection détaillée précédent.
- Tous documents pouvant faciliter la mission d'inspection détaillée.
- Compte rendu des investigations complémentaires effectuées depuis la dernière inspection

Documents à établir au cours de l'inspection

Levés d'intrados

L'équipe d'inspection effectuera les levés à l'échelle du 1/100, non déformée.

Le levé sur le terrain -« la minute de terrain »- est effectué sur un support de papier millimétré, ou sur le levé de l'inspection précédente comportant un carroyage, ou par tout autre procédé -par exemple informatique- donnant le même niveau de précision.

La notation générale des désordres sur les plans doit respecter une codification telle qu'ils soient interprétables sans ambiguïté par toute personne appelée à les consulter. Elle pourra s'inspirer de celle qui est proposée dans le Guide de l'inspection des tunnels routiers du CETU. Dans le cas présent, le revêtement étant uniquement du béton pourra être représenté sans figuré.

Réunion de synthèse

Avant la fin de la visite a lieu sur place une réunion avec la subdivision gestionnaire et la CDOA au cours de laquelle les agents en charge de l'IDP présentent les désordres et justifient la cotation IQOA (Image de la qualité des ouvrages d'art) proposée. Cette cotation est basée sur le guide de l'inspection des tunnels routiers édité par le CETU, qui comporte un catalogue des désordres.

Documents à remettre

Levés d'intrados

Les dessins seront numérisés sur support informatique par digitalisation des levés de terrain. Le logiciel de traitement doit être compatible avec AUTOCAD (ou autre suivant équipement de la CDOA).

Les limites et les échelles devront être identiques pour tous les levés. L'échelle de sortie pour la réalisation du dossier est le 1/100ème, à présenter soit sous forme de cahier A3 ou A4, soit sous forme de plans pliés.

Chaque entité (dégradations) est reportée sur un plan qui lui est propre, et caractérisée par une couleur. Le dessin final est constitué par la juxtaposition des différents plans. Le document informatisé doit permettre les restitutions suivantes :

Plans à fournir obligatoirement :

- Fond de plan : dessin de l'ouvrage à échelle non déformée.
- Plan Texte : il comprend les textes servant à la définition de l'ouvrage et à divers observations.

Plans à fournir en fonction des désordres constatés :

- Plan des fissures longitudinales
- Plan des fissures transversales
- Plan des fissures obliques
- Plan des zones instables
- Plan des zones sonnant le creux
- Plans des zones diverses présentant d'autres types de désordres (concrétions, ragréages, cavités, nids de cailloux, etc.)

Rapport d'inspection

Le rapport d'inspection complète et interprète les levés d'intrados en fournissant une description des dégradations, une analyse des désordres avec recherche des causes.

Il formule des recommandations sur les éventuelles mesures sécuritaires à prendre, et l'instrumentation à mettre en place le cas échéant, ainsi que des investigations complémentaires.

Il comporte en annexe un dossier photographique destiné à illustrer et à faciliter la compréhension de la description des observations, des désordres.

Le levés d'intrados et le rapport d'inspection seront remis en x (x étant à préciser) exemplaires, plus un sur support informatique.

Les résultats de l'évaluation IQOA sont remis avec le rapport d'IDP sous la forme d'une fiche de cotation IQOA du Génie Civil, dont un exemple est fourni dans l'annexe 7 qui contient également la définition des classes IQOA pour les tunnels.

Annexe 3

Conditions de sécurité à respecter lors des actions de surveillance et d'entretien programmées

Difficultés spécifiques d'intervention

Préambule

Conformément au décret n°77-1321 du 29 novembre 1977, modifié par le décret n°92-158 du 20 février 1992, le RGR ou son représentant communique aux entreprises ou administrations intervenant sur un chantier de visite, d'inspection ou de travaux de tunnel ou de tranchées couvertes, le Cahier des Clauses Administratives et Techniques sur la Prévention et la Sécurité (CCAT-PS) qui a pour objet de définir les mesures de sécurité que les salariés doivent scrupuleusement respecter à l'occasion de leur travail ou de leurs déplacements en vue d'éviter les risques d'accidents pouvant résulter de ces visites ou de ces travaux.

Le CCAT-PS a pour objet de définir les mesures essentielles que doit prendre le personnel pour assurer sa propre sécurité, 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, des installations, utilisés sur toute l'étendue du chantier.

A.1. 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 ou en tranchées couvertes, doivent respecter la réglementation afin de neutraliser au maximum 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 de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art deuxième partie fascicule 2.

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

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

A.2. Dispositions particulières – mesures de sécurité

▶ *Les interventions en tunnel ou en tranchée couverte*

Les interventions en tunnel ou en tranchée couverte comportent généralement des dangers plus importants que ceux des travaux à l'air libre, tant par leur nature et leur localisation très souvent en voûte, 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, etc.

Toutes les dispositions appropriées pour les éviter doivent être prises en temps utile. Le chef de la subdivision d'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 sur le comportement des conducteurs.

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 ou de la tranchée couverte (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 ;
- chantier lui-même : éclairage général avec des moyens puissants pour attirer de loin l'attention des conducteurs ;
- signalisation de position et signalisation intercalaire : même dans les tunnels ou tranchées couvertes équipés d'un éclairage fixe, les signaux et panneaux réglementaires qui ne sont normalement que rétro-réfléchissants doivent en outre être éclairés.

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

Le chef de la subdivision d'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 ou la tranchée couverte. Les panneaux de limitation de vitesse doivent être éclairés ou munis de feux à éclats synchronisés.

Les mesures à prendre contre la pollution produite par les différents engins de chantier, et prévues dans le plan de prévention et de sécurité, devraient en principe suffire pour que les usagers, qui ne séjournent qu'un temps relativement court, ne soient pas gênés, les concentrations maximales admissibles étant, dans ce cas, très supérieures à celles s'appliquant à une exposition de longue durée.

Toutefois en cas de circulation alternée, de ralentissement ou d'arrêt prolongé, le chef de la subdivision d'exploitation de la voie veillera à ce que les usagers 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).

Les interventions dans les gaines techniques ou de ventilation 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 étant très longue, elle ne devra 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 visités 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. L'outillage électrique utilisé est de classe II avec protection 30 mA.

Application du décret n°92-158 du 20 février 1992

Conformément au décret n°92-158 du 20 février 1992, de la circulaire d'application n°93-14 du 18 mars 1993 et de l'arrêté du 19 mars 1993, les prescriptions d'hygiène et de sécurité applicables aux interventions effectuées sous tunnels ou tranchées couvertes par une entreprise extérieure doivent faire l'objet **d'un plan de prévention** notamment dans les cas suivants :

- durée du chantier supérieure à 400 heures ;
- travaux exposant à des risques de chute de hauteur de plus de trois mètres ;
- travaux en atmosphère confinée.

Dans les cas où le plan de prévention n'est pas obligatoire, il est recommandé au chef de la subdivision d'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 le gaz carbonique et les poussières;
- les conditions d'éclairage;
- la gestion des liaisons entre les intervenants et l'extérieur;
- les consignes d'intervention.

A.3. 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 : Effectif 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 Port des Equipements de Protections Individuelle (EPI) pour les agents :.....
MODALITES D'INFORMATION DES SALARIES INTERVENANT SUR LE SITE PAR LE RESPONSABLE DES TRAVAUX

Les risques et leurs moyens de prévention

Définition des risques	Moyens de prévention
Heurt par véhicules	<ul style="list-style-type: none"> - Tous les véhicules de l'entreprise seront équipés de marquage arrière, de bandes rétro-réfléchissantes, de gyrophare orange. - Lors des déplacements courts à pied, le port des protections individuelles conformes aux normes en vigueur est obligatoires*. - Mettre en place la signalisation temporaire. - Mettre en marche l'éclairage et la ventilation. - Indiquer au personnel les consignes éventuelles.
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, ne pas déplacer.
Asphyxies, fumées	<ul style="list-style-type: none"> - Détecteurs de CO. - Aérage. - Utiliser les masques de protection à filtres.
Bruit	<ul style="list-style-type: none"> - Porter les protections auditives.
Chute de grande hauteur	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser une nacelle élévatrice ou un échafaudage. - Utiliser le harnais de sécurité.
Incidents en cours d'opération dans les puits	<ul style="list-style-type: none"> - Intervenir par binôme** avec : <ul style="list-style-type: none"> • 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"> - Condamnation des automatismes de commande de la ventilation par l'exploitant.
Électrocution	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser un appareillage de classe II et protégé 30 mA. - Se munir d'un éclairage de secours frontal.

* Actuellement, tenue de classe II ou III conformes à la norme E 471.

** Dans des cas particuliers, la présence d'une troisième personne peut être requise.

Annexe 4

Principes de partition d'un tunnel

A.1. But de la partition

La partition doit permettre de visualiser immédiatement, sous forme synoptique, les principales parties du génie civil de l'ouvrage, les zones de désordres reconnus, les zones sensibles à surveiller plus fréquemment (fréquence définie dans le rapport d'IDP), l'évaluation IQOA.

Elle permet ainsi de découper le tube en une succession de tronçons « homogènes ».

A.2. Structure du document synoptique

Un exemple de document synoptique est fourni ci-après.

Il se présente sous la forme suivante :

A.2.1. Parties d'ouvrages issues de la conception et de la construction du tube

Les données de conception et de construction sont définitives (sauf travaux lourds de réhabilitation). On identifiera :

- **structure générale** : tous les ouvrages attenants au tunnel creusé, s'il y a continuité du passage en souterrain ;
- **géométrie** : les différents profils en travers utilisés ;
- **géologie** : les différents terrains traversés et les problèmes significatifs rencontrés au cours du creusement ;
- **soutènement** : les différents types de soutènements mis en place ;
- **étanchéité, drainage** : les différents systèmes installés ;
- **revêtements** : les différents types de revêtements (ou leur absence en tunnels anciens) ;
- **etc.** : suivant l'ouvrage, d'autres lignes peuvent être ajoutées si des aménagements spécifiques ou des conditions naturelles le méritent.

Une première synthèse (Synthèse I) est établie sur la base de la superposition des lignes ainsi définies.

A.2.2. Tronçons définis au cours des ID successives

Ces données sont représentatives des constatations faites lors d'une inspection détaillée. Certaines d'entre elles varient d'une inspection à la suivante :

- **désordres** : on définira autant de lignes dans le synoptique que de désordres significatifs rencontrés dans l'ouvrage ;
- **venues d'eau** : elles doivent toujours faire l'objet d'une ligne séparée dans le tableau.

A.2.3. L'évaluation de l'ouvrage

Ces éléments constituent la synthèse de chacune des inspections détaillées. Certains d'entre eux varient d'une inspection à la suivante :

- **tronçons sensibles** : ils sont définis par l'inspecteur d'ouvrage. Ces zones devront faire l'objet d'une attention particulière par le chef de la subdivision d'exploitation dans le cadre de ses contrôles annuels. Suivant le type de désordre présent, elles peuvent faire l'objet d'inspections détaillées plus rapprochées, d'une mise sous surveillance renforcée, voire de réparations.
- **IQOA** : les tronçons issus de la synthèse (partie I) et ceux définis par les ID (partie II) sont notés par l'inspecteur suivant la grille d'évaluation « IQOA-tunnels », en distinguant le génie civil (GC) et l'action de l'eau.
- **synthèse IQOA** : cette ligne donne le recouplement des cotations spécifiques GC et eau. Une cotation IQOA globale est donnée à la fin du document.

A.3. Élaboration du document synthétique

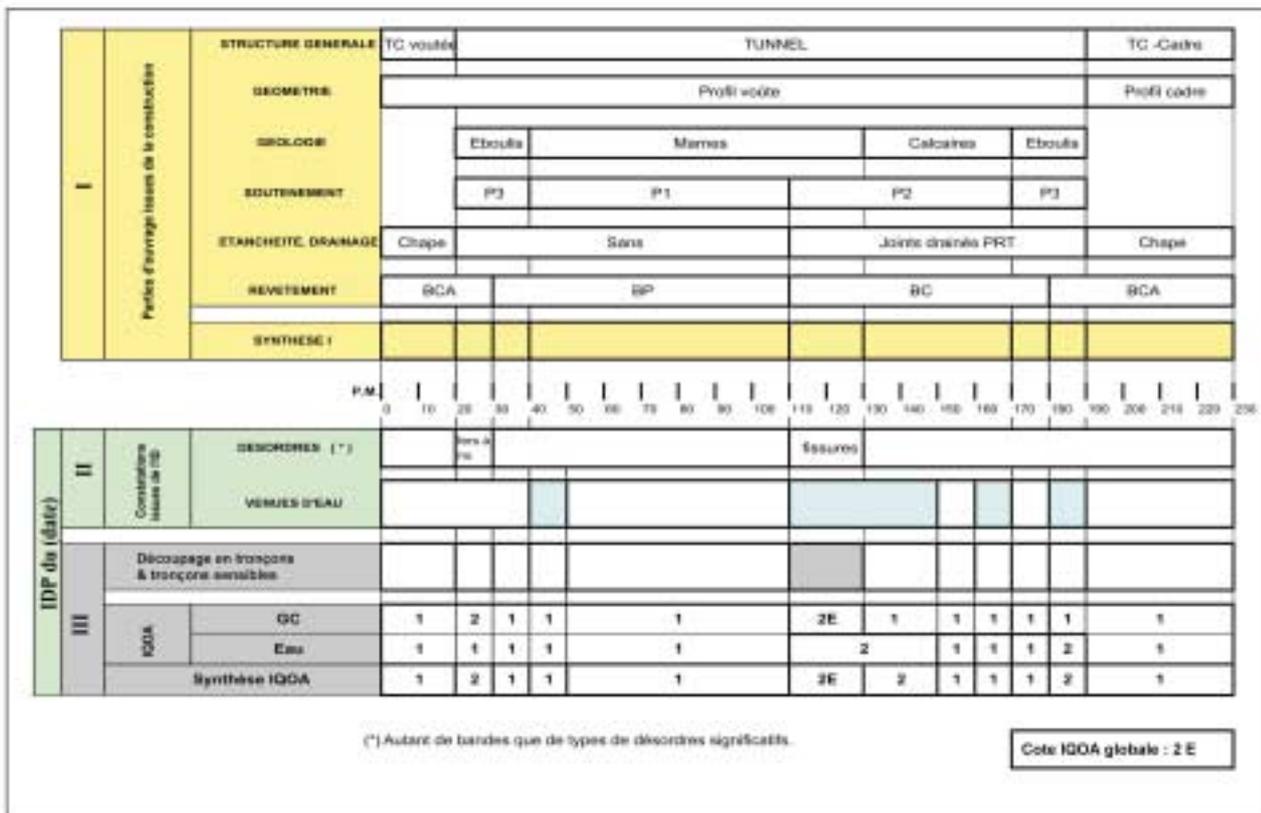
▶ *Tunnels neufs (ou récents)*

La partie I, la plus importante pour la connaissance de l'ouvrage, doit être élaborée et actualisée par le service ayant assuré la maîtrise d'œuvre de la construction. Cette pièce doit faire partie du document de synthèse du génie civil. Tous les tronçons seront repérés en fonction des PM définitifs de l'ouvrage qui seront reportés sur le synoptique suivant. 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 devront s'appuyer sur les données du suivi de chantier. Ce synoptique sera fourni à l'inspecteur d'ouvrage avant chaque ID.

Les parties II et III, reflétant l'inspection détaillée de rang i, seront renseignées par l'inspecteur et proposées au chef de la subdivision d'exploitation pour validation.

▶ *Tunnels anciens (ou sans archives)*

On établira un tel synoptique à l'aide de toute la connaissance rassemblée.



Exemple de document synoptique illustrant la partition d'un tunnel

Annexe 5

Conception et codification des levés d'intrados

L'adoption d'une codification générale est indispensable pour les raisons suivantes :

- le levé d'intrados² 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 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.

A.1. Le report des observations

La méthode utilisée consiste à reporter les observations sur un **plan développé**³ de la voûte supposée vue de dessus et « écrasée » sur un plan horizontal, afin d'obtenir une « cartographie » de l'intrados ( **Figures 3 et 4**).

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, etc.) ;
- 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.

A.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 décamétrique préalable de l'ouvrage est essentiel pour localiser précisément les objets ( **Marquage d'un tunnel p. 60**) ;
- le levé d'intrados se présente sous la forme d'une bande rectiligne, dont la largeur est égale à la développée de l'ouvrage levé, et pourvue d'une échelle des PM (points métriques). Pour une bonne maniabilité, sa longueur est limitée à 1 m (soit 100 m de voûte représentée au 1/100).

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, dans les 2 dimensions du plan. Pour de grandes développées, et afin que le levé reste facilement maniable, une échelle au 1/200 peut être localement utilisée.

2. **Intrados** : surface visible d'un revêtement ou d'une excavation (par extension).

3. **Développée de voûte** : périmètre de l'intrados (hors chaussée et trottoirs) calculé d'après un profil en travers coté ou mesuré sur place. Cette valeur définit la largeur du levé de voûte.

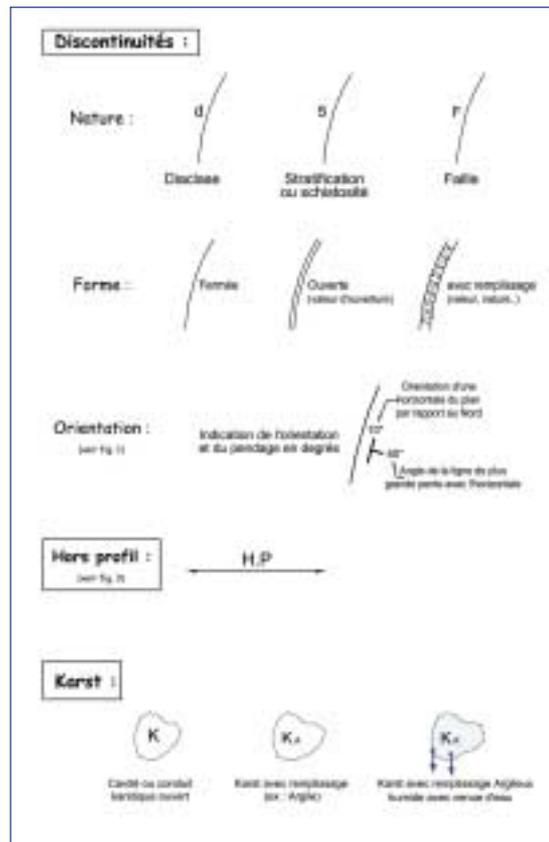
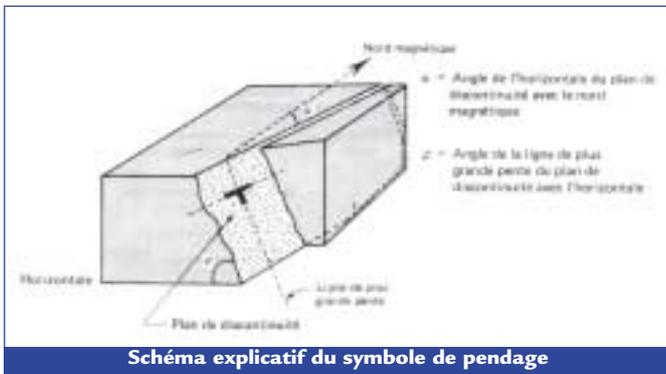
Pour faciliter le levé détaillé sur le terrain, il est préférable de conserver la même échelle de représentation dans le sens transversal et le sens longitudinal. En revanche, une diminution de l'échelle longitudinale est acceptable en vue d'une représentation définitive plus synthétique (traitement informatique ultérieur au bureau).

A.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 immédiate des désordres (superficie, répartition, risque induit) plutôt que celle du terrain ou des revêtements.

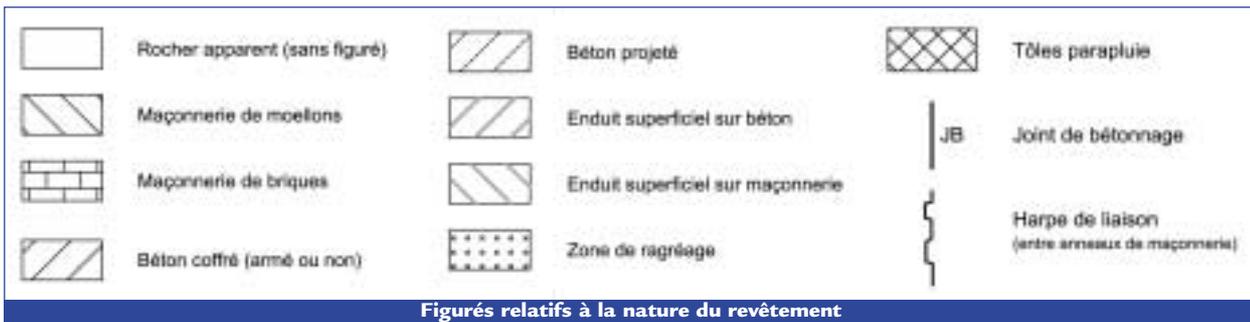
A.3.1. Les conventions des représentations géologiques

Une partie de la symbolique géologique est devenue un standard de fait (conventions de notation des pendages, de caractérisation des fissures, de joints).



A.3.2. Les figurés et symboles

Si une grande liberté est laissée quant à leur nombre et à leur définition, adaptés aux désordres spécifiques des ouvrages d'un parc, leur application doit être strictement observée (homogénéité des levés). L'emploi de couleurs doit permettre de simplifier les figurés tout en améliorant la lisibilité du document. Les exemples donnés ci-après ne constituent pas des règles.

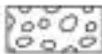
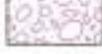


Figurés illustrant les désordres

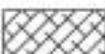
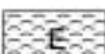
Chaque figuré de désordre doit être d'autant plus lisible que le risque lié est grand.

	Zone de déformation, ventre
	Exfoliation de moellons (profondeur moyenne en cm)
	Déjointoiement (profondeur moyenne en cm)
	Moellons tombés

Spécifiques aux maçonneries

	Ségrégation de granulats
	Reprise de gachée
	Altération profonde

Spécifiques aux bétons

	Zone sonnante le creux
	Zone ou panneau instable
	Ecaillage mécanique

Fissuration

vous l'observateur

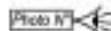
f. 3 — Ouverture en mm

r = 1 — Déshébergement en mm avec indication des mouvements relatifs des lèvres

Communs (non revêtu, maçonnerie, béton)

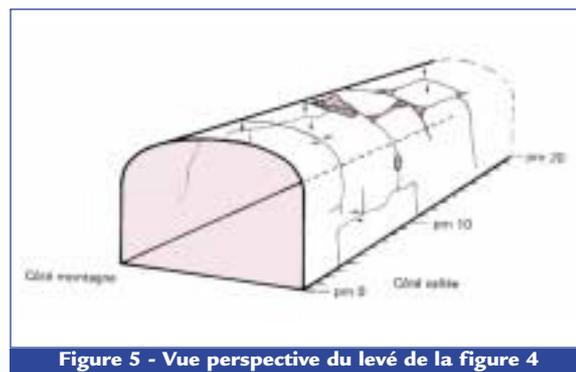
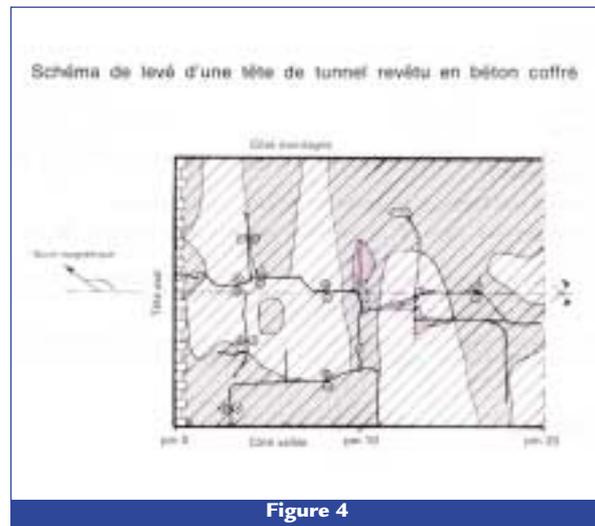
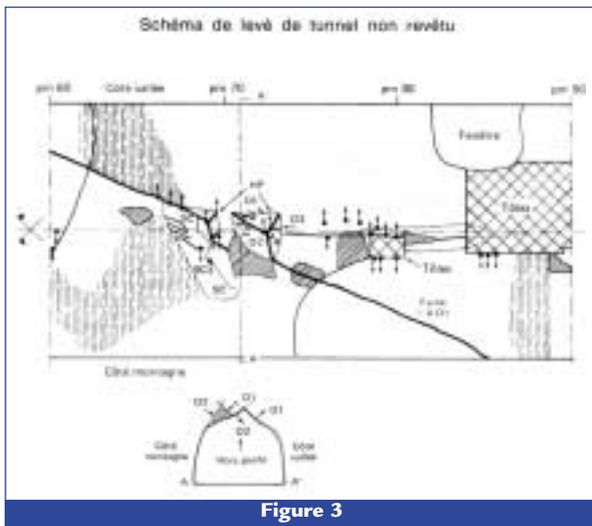
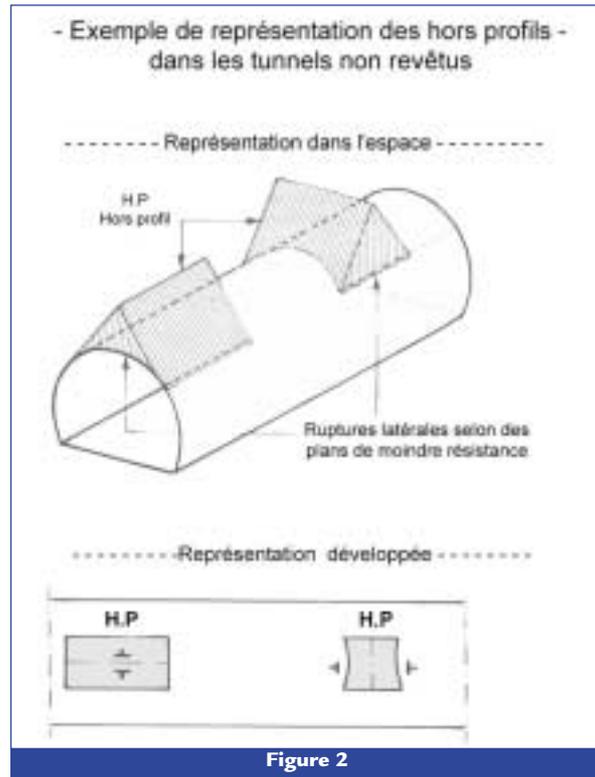
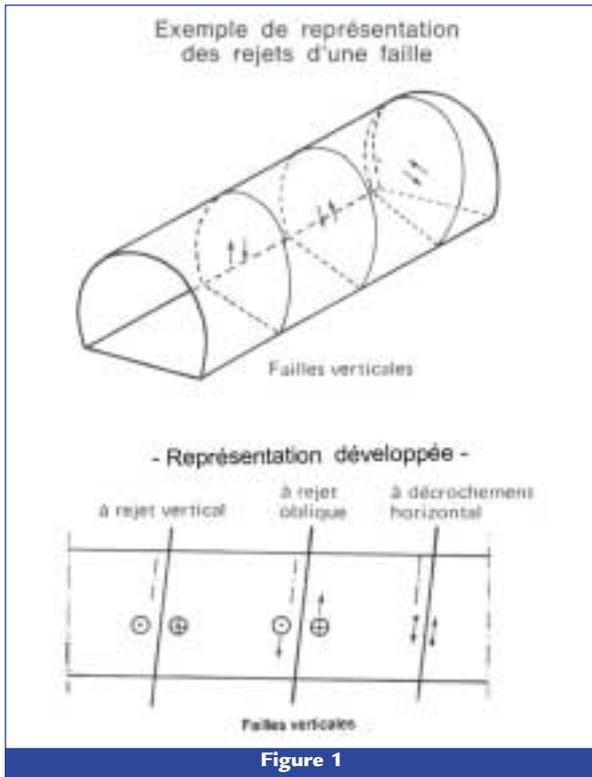
	Zone d'humidité diffuse
	Suintements (débit non jaugéable)
	Venue d'eau (V.E) ponctuelle (gouttes)
	Venue d'eau continue (débit jaugéable)
	Présence de glace
	Concrétions (draperie ou isolé)
	Traces sèches de V.E temporaires

Spécifiques aux venues d'eau

		Sondage destructif ou forage carotté
		Emplacement photo (rapport inspection)
		Point à observer référencé dans le rapport (surveillance continue)

Symboles divers

Schémas explicatifs



Annexe 6

Marquage d'un tunnel

A.1. But du marquage

Quelles que soient les actions de surveillance ou d'exploitation, il est nécessaire de localiser avec précision les constatations effectuées.

Ce repérage est matérialisé par des plaques fixées sur le parement. On parle alors de « points métriques » ou PM. Lorsqu'il y a des gaines de ventilation, chaque gaine doit être balisée de la même façon.

A.2. Le marquage vu par l'exploitant

Il est destiné à repérer un fait ou un objet situé dans le tube, mais sans précision excessive.

Plusieurs systèmes ont été rencontrés :

- numéros de profils (issus du chantier) ;
- numéros d'anneaux de béton (ou plots) ;
- plaques au pas de 25 m, 50 m, 100 m ;
- plaques de PR (Point Routier, anciennement PK, Point Kilométrique) ;
- aucun marquage, ou repérage « par habitude » par rapport à des niches numérotées.

A.3. Le marquage destiné à la surveillance

Celui-ci est essentiellement destiné au relevé d'intrados effectué depuis le sol, puis d'une nacelle, par l'équipe de spécialistes en charge de l'inspection détaillée.

Il apparaît impossible de se repérer rapidement avec un marquage trop espacé.

Un espacement de 10 m (marquage décimétrique) sera adopté.

Dans le cas de 2 tubes parallèles, chacun d'entre eux aura son propre marquage, mais **le sens de ces marquages sera le même**. En effet, si des désordres apparaissent, les corrélations entre les tubes, voire avec la géologie du massif, seront facilitées.

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.

A.4. Origine du marquage

Les entrées en tunnel sont parfois complexes (casquettes, têtes architecturales...) et la véritable entrée en souterrain n'est plus visible.

Aussi, par souci de simplification, et **pour les ouvrages à venir** (ou non encore marqués), on adoptera comme **PM 0 le premier profil en travers fermé**.

Pour les besoins de la surveillance, la position précise des fronts d'entrée en souterrain (ou des fronts d'attaque intermédiaires) pourra toujours être recalculée à l'aide des archives de construction, et reportée en marges des levés de voûte. Ainsi, tout objet géologique rencontré pendant le creusement sera facilement situé à l'aide des relevés de chantier (DS25 = document synthétique par 25 m).

A.5. 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 conservera néanmoins dans le souci de pérennité de suivi. **Il ne doit pas être modifié dans le temps**, sauf si l'ouvrage a été profondément transformé.

▶ *Précis*

La méthode la plus sûre, nécessitant un géomètre, consiste à projeter les PM précis calculés sur l'axe du tube (et non du projet) sur l'un des parements.

En l'absence de géomètre, ou pour des tunnels anciens ou courts, un ruban (le plus long possible) sera déroulé à la base d'un piédroit, permettant de matérialiser l'emplacement des valeurs décimétriques.

Cette méthode demande un soin maximum, car les erreurs de recalage du ruban peuvent rapidement se cumuler jusqu'à atteindre 2 à 3% de la longueur totale.

L'emploi des odomètres est déconseillé, leur usure entraînant de fortes erreurs cumulées. Il en est de même des topo fils.

▶ *Fixé à l'abri des accrochages par les véhicules et du vandalisme*

Une hauteur minimale de 2 m est une sécurité.

▶ *Lisible de loin (8 à 10 m de distance) aussi bien à pied qu'en voiture*

Les chiffres auront 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 veillera à les récupérer pour leur repose précise.

A.6. Nature des plaques

Les plaques en aluminium embouti de type «minéralogique» sont adaptées aux supports irréguliers telles que les maçonneries ou le rocher. Sensibles à la corrosion dans certains tunnels, elles deviennent progressivement difficiles à lire.



Les plaques plastiques gravées ou sérigraphiées conviennent pour les parements lisses, tels que ceux de béton coffré. Fragiles aux chocs et supportant mal les déformations, elles ont l'avantage d'être inaltérables. Cependant, on évitera les plaques rétro-réfléchissantes incompatibles avec les méthodes de relevé en continu (scanner,...).



A.7. Fixation des plaques

- **spits** : suivant le support, la tenue est aléatoire et la durée de vie assez courte ;
- **trou à la perceuse et cheville + vis mécanique** : meilleur système qui s'adapte à tous les supports. Sur des tôles, on utilisera des vis parker. L'emploi d'acier inoxydable est impératif ;
- **scellement au ciment prompt** : à éviter (décollements rapides) ;
- **collage à la résine (ou colles spéciales)** : valable uniquement sur un support de béton neuf et régulier.

Annexe 7

L'évaluation IQOA

La démarche IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art) a été initiée en 1994 par la Direction des Routes du ministère de l'Équipement. Il s'agit d'un outil destiné à évaluer l'état du patrimoine et à définir une politique de gestion et d'entretien (Fascicule 1, chapitre 2). Une adaptation a été faite pour les tunnels, conduisant à la définition des classes IQOA, présentée ici :

DEFINITION DES CLASSES IQOA POUR LES TUNNELS

Cotation " GENIE CIVIL "

L'état des tunnels est caractérisé par 5 classes, dont la définition prend en compte le rôle joué par le terrain encaissant.

CLASSE 1:

Ouvrage en bon état apparent, ne nécessitant que de l'entretien courant ou des nettoyages.

CLASSES 2 :

Tunnels revêtus : Le revêtement présente des désordres superficiels dont l'origine est indépendante des conditions de stabilité d'ensemble de la structure (celle-ci comprenant le revêtement et le terrain encaissant).

Tunnels non revêtus : Les défauts affectant l'intados sont superficiels et limités, correspondant à une évolution normale d'une surface de terrain naturel exposé à l'air. Ils ne traduisent pas une instabilité locale ou générale du massif.

Les tunnels de cette classe nécessitent un diagnostic qui peut déboucher sur un entretien spécialisé (Entreprises spécialisées).

On pourra distinguer 2 classes selon que les désordres présentent :

CLASSE 2 : Aucun caractère d'urgence.

CLASSE 2E : Du fait de l'évolution (E), une urgence à établir le diagnostic ou à prévenir le développement rapide de désordres plus importants et le classement ultérieur en 3.

CLASSES 3 :

Tunnels revêtus : Les désordres observés sur le revêtement indiquent que celui-ci est dégradé profondément ou que le terrain est impliqué, autrement dit que la stabilité d'ensemble de la structure est susceptible d'être compromise, ce qui nécessite des travaux de réparation.

Tunnels non revêtus : Le massif dans lequel est creusé le tunnel présente des risques d'éboulements localisés ou généralisés, nécessitant des travaux de confortement ou de protection.

On pourra distinguer 2 classes, selon que la réparation présente :

CLASSE 3 : Aucun caractère d'urgence.

CLASSE 3U : Une urgence (U) à réaliser les travaux ou à faire un diagnostic du fait du risque d'évolution rapide des désordres mettant en danger la pérennité de l'ouvrage.

Les travaux de réparation des tunnels classés en 3 ou 3U doivent généralement être précédés de reconnaissances et/ou d'inséculations, pour une meilleure adaptation aux conditions géotechniques locales, souvent mal connues.

RISQUE POUR L'USAGER :

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

Cotation " ACTION DE L'EAU "

L'état des tunnels est caractérisé par 3 classes, dont la définition prend en compte le rôle joué par l'eau.

CLASSE 1

Aucun problème d'eau, sinon des plages humides ou suintantes n'ayant pas d'influence sur l'exploitation de l'ouvrage ou l'état des structures.

CLASSE 2

Présence d'eau, pouvant constituer une gêne spécifique (gouttes ou flaques en parties circulères) ou entraîner à long terme une aggravation des désordres affectant les structures, mais ne mettant en cause ni la pérennité de l'ouvrage, ni la sécurité des usagers.

CLASSE 2E

La stabilité de l'ouvrage risque d'être compromise par l'importance des débits ou des charges hydrauliques, ce qui doit conduire à renforcer la surveillance et à prendre des mesures pour en limiter l'action.

RISQUE POUR L'USAGER :

MENTION " S " : Cette mention complémentaire "S" peut s'appliquer aux 3 classes précédentes lorsqu'il y a danger vis à vis de la sécurité des usagers. Dans la plupart des cas, elle est utilisée lorsque l'action du gel crée un risque pour les usagers (stalactites de glace, amas sur la chaussée, verglas). Cela nécessite que des travaux spécifiques soient entrepris, relayant les dispositions sécuritaires prises par l'exploitant.

A.1. Principe

L'évaluation de chaque ouvrage est réactualisée à chaque inspection détaillée complète ou partielle. Cette dernière n'est effectuée que pour les tunnels dont l'un des tronçons est affecté d'une note strictement supérieure à 2.

A.2. Grille de notation adaptée aux tunnels

Une notation «Action de l'eau» a été ajoutée afin d'évaluer ce paramètre important, aussi bien en terme de désordres aux structures que de sécurité des usagers.

A.3. Commentaire sur le tableau des plages de notation IQOA

Le tableau de la page 64 donne la plage de notation possible de chaque désordre, pris séparément. La colonne «S» indique si le désordre est susceptible d'engager la sécurité des usagers; la mention S devra donc être rajoutée à la note génie civil, si besoin est.

A.4. Procédure de notation

Chacun des désordres reconnu est censé être évalué sur la base de la grille. Pratiquement, il est préférable de définir dans le tunnel des tronçons homogènes en terme de gravité de désordres et de leur affecter une note IQOA globale. Cependant, un désordre isolé préoccupant peut aussi recevoir une note spécifique; il sera repéré sur les levés comme étant un «point à observer (ou P.O.)» à vérifier régulièrement (surveillance continue, contrôle annuel) et repris dans la fiche d'évaluation du tunnel dont un exemple est fourni.

Au terme d'une inspection détaillée, l'évaluation de tous les désordres permet de définir des tronçons de longueurs connues caractérisés par une pathologie particulière.

La note de synthèse de l'ouvrage apparaissant en tête de la fiche jointe permet seulement au gestionnaire de hiérarchiser les ouvrages de son parc.

Partie d'ouvrage	Titres		Tronçons				Zones surveillées	Synthèse
	1	2	Tranchées couvertes	Tranchées couvertes	T. creusé zone 1	T. creusé zone 2		
Type de structure	avrilés/urals	lignes	caître BA sans gaines	caître BA avec gaines	lattes coffré section courante	lattes coffré section renforcée		
PM (départ)	0-20	1400-1500	20-50	50-200	200-1000	1000-1100		
Intrados partie courbe			fils apparents 1	écailles sur fils 1	fissures transversales 1	fissures obliques P01 - P02 P1 2		2
Intrados gaines				1	fissures longitudinales 1	fissures obliques P03 2		2
Dalle de plafond				décollement de ragréage 1	écaillures de ragréage 1	1		1
Croûtes				1	1	1		1
Appui dalle plafond				1	écailles et écaillures 1	1		1
Chauxes				1	1	1		1
Drainage				1	encroûtements et dépôts 1	encroûtements et dépôts 1		1
Assèchement			débris dans les regards déboucheurs 1	débris dans les regards déboucheurs 1	1	1		1
Action de l'eau			1	1	gouttes d'eau P04 1	gouttes d'eau P05 1		1
Anomalies susceptibles	Batterie réchauffement				PM 400, PM 600 1			1
	Ry sans piléons		Pré-lit: concretions humides 1	PM 250 : Cq (Alpaga humides) 1	1	1		1
	Plais				PM 600 fissures et tarabouzes 1			1
	Refuges piétons			1	1	1		1
	Galérie d'évacuation au feu					PM 750 1		1
Synthèse	1	1	1	1	1	2		2
Observations :								
Cotation établie par : _____ le : _____								
Cotation validée par le responsable de CDQA, _____ le : _____								Synthèse pour le tube 2
[*] P0 - Point à observer lors des contrôles.								
[**] La classe de synthèse de l'ouvrage est en principe la plus élevée de celles relatives à chacune des parties constitutives.								

Exemple d'évaluation IQOA d'un tunnel

Plages de notation IQOA des désordres

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

Annexe 8

Cadre type de rapport d'inspection détaillée

Ce cadre ne s'applique qu'aux inspections détaillées périodiques des tunnels.

Pour les autres types d'inspection (IDI, exceptionnelle), l'agent conduisant la visite peut, 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 et de son responsable ;
- les noms, qualités, niveaux de spécialité et signatures : de l'agent ayant conduit l'inspection, de l'ingénieur responsable, et du responsable de l'affaire/directeur du service prestataire ;
- les noms et qualités des destinataires du rapport et le nombre d'exemplaires communiqués à chacun d'eux.

A.1. Identification

RGR

Service gestionnaire
Arrondissement
Subdivision

Département, Commune

Voie concernée: Type de voie, Numéro de voie, Catégorie de voie

PR de la tête origine

Nom principal de l'ouvrage

Identifiant de l'ouvrage

Aménagements de surfaces et subdivision (s) d'exploitation

Voies latérales et subdivision (s) d'exploitation

Voies franchissantes et subdivision (s) d'exploitation

Avertissement:

Les trois 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. En l'absence d'archives (tunnels anciens), il constitue la seule synthèse sur l'ouvrage et doit être renseigné de la manière la plus complète possible

A.2. Caractéristiques générales

Résumé des principales caractéristiques de **chaque tube** (cas de tunnels bi-tubes).

Ce document gagne à être établi une fois, puis mis à jour régulièrement.

Structure générale de l'ouvrage

Définir des parties homogènes repérées en PM (fausse tête, station, tranchée couverte,...)

Géométrie

Définir des parties homogènes repérées en PM (voûte, cadre, non revêtu,...)

Modes de creusement

Nombre d'attaques, technique employée

Soutènements

Définir des parties homogènes repérées en PM (profils type réalisés)

Drainage, Étanchéité de la voûte

Revêtements

Définir des parties homogènes repérées en PM (béton coffré, armé, projeté, maçonnerie...)

Assainissement

Plate-forme et chaussée

Aménagements remarquables

Ouvrages annexes (souterrains et extérieurs)

On trouvera un plan définissant les limites du tunnel aux têtes et les zones qui sont du ressort de la subdivision d'exploitation

Dispositifs de surveillance installés (nature, localisation)

Indiquer dans quels buts. Y a-t-il des seuils d'alerte?

Réseaux transitant dans l'ouvrage (EDF/GDF, France Télécom, eau potable, assainissement, autres)

Ouvrages proches (nature, distance, propriétaire, régime administratif)

A.3. Conception & execution

Maîtrise d'œuvre études et travaux

Entreprise ou groupement titulaire du marché de construction (n° du marché)

Entreprises sous-traitantes

Dates de construction (début, fin des travaux)

Date de mise en service

Grosses réparations ou améliorations

A.4. Contexte géotechnique

Nature générale du terrain encaissant

Coupes éventuelles, extraits de DS25 (Document synthétique par 25 mètres: document établi 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

A.5. Vie de l'ouvrage

Documents de référence :

Dates des précédentes inspections détaillées – références des dossiers

Date de la dernière évaluation IQOA – référence du dossier

Bref résumé des conclusions des inspections (visites) antérieures

Travaux d'entretien et de réparation 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 (depuis la dernière action de surveillance)

Investigations ou surveillances spécifiques mises en œuvre (depuis la dernière action de surveillance)

Régime de surveillance adopté

Mesures de sécurité particulières

A.6. Conditions d'exécution de l'ID

Motif et particularités de l'inspection

Dates, durée

Ingénieur responsable

Équipe d'inspection

Moyens mis en œuvre

(matériel, véhicule spécifique, restrictions de circulation, fermeture complète, personnel de sécurité...)

Nature et description du repérage utilisé

Liste des documents utilisés

Définition précise des parties d'ouvrage concernées (ou non concernées) par l'ID

Conditions météorologiques

A.7. Constat

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 préjudiciable à la sécurité des usagers ou à la pérennité de certaines structures du tunnel

Risques présents dans l'emprise du tunnel préjudiciables aux riverains

Constatations concernant l'intrados du tunnel

Description et analyse des désordres reconnus et notés sur les levés d'intrados (annexe A)

Photographies d'ensemble et de détail

Suivant la configuration du tunnel, on raisonnera par tronçons dans le sens des PM, ou par type de revêtements.

Maçonneries: description de l'appareillage, état des moellons, des mortiers, venues d'eau; déformations, ventres, fissuration, zones sonnante le creux; état des réparations anciennes.

Bétons: description de l'aspect général, longueur des anneaux; traitement des joints; désordres divers, fissuration (retrait, rupture...), zones sonnante le creux, venues d'eau.

Non revêtu: localisation et description précise des masses instables ou potentiellement instables (nature, volume), venues d'eau.

Dispositifs de drainage, étanchéité: description, désordres

Dispositifs d'assainissement: description, désordres, état d'engorgement

Chaussée, bordures de trottoirs: description, désordres

Remarque: de toutes ces constatations doivent être sélectionnées celles qui constituent des points à observer (PO) lors des contrôles annuels, et qui doivent être signalées par ailleurs sur les levés.

A.8. Investigations, mesures, essais

Exploitation des :

- investigations complémentaires, essais : raison, nature, description
- mesures : nature, description, résultats

effectués depuis la dernière inspection.

A.9. Note de synthèse

Conclusions de l'ID – évolutions par rapport aux inspections précédentes.

Synthèse et interprétation des mesures, investigations, essais.

Liste des **points à observer (PO)** lors des contrôles annuels.

Propositions de mesures de sécurité si nécessaire, de modification du régime de surveillance (modification de périodicité, mise en surveillance renforcée, etc.)

Les points menaçant la sécurité immédiate des usagers (et/ou des structures) devront être clairement définis et repérés. Le chef de la subdivision d'exploitation devra en être averti dès la constatation avec constat sur place ( Éléments d'un cahier des charges type d'inspection détaillée p. 44 ).

Proposition de cotation IQOA pour le tube

Propositions d'investigations complémentaires

Suggestions concernant l'entretien courant et spécialisé

Suggestions concernant les réparations à prévoir (degré d'urgence, type d'action)

A.10. Annexes au rapport

Annexe A: Dossier des levés d'intrados

Annexe B: Dossier des planches

- Détails de structure concernés par des désordres (extraits du dossier d'ouvrage, ou recréés)
- Graphes, histogrammes, dessins éclairant le constat

Annexe C: Photographies légendées (leur position sera portée sur les levés)

Annexe D: Fiche de cotation IQOA

Annexe supplémentaires suivant besoin (essais, mesures, coupes de sondages, etc.)

Annexe 9

Les différentes parties d'un tunnel au sens de l'inspection

Cette annexe sert à recaler un certain nombre de notions et en particulier le vocabulaire généralement utilisé dans la préparation et le bilan des inspections.

A.1. Tunnel et tube

De nombreux franchissements souterrains routiers sont constitués de deux tunnels sensiblement parallèles rassemblés sous une seule appellation (*ex: tunnel de Fourvière*). Si ce regroupement est pertinent en terme d'itinéraire ou d'exploitation, il ne l'est plus pour ce qui concerne les inspections ou la surveillance. Deux tunnels, même très proches, peuvent différer sensiblement en terme de géologie, soutènement, revêtements, évolution dans le temps. Le terme « tunnel » est donc employé dans ce guide au sens de « tube ».

A.2. Qu'est-ce qu'un tunnel ?

Au sens strict du terme, le tunnel est la partie creusée de l'ouvrage, ce qui exclut toutes les structures construites à l'air libre.

Cependant, du point de vue de l'exploitation de l'ouvrage, le « tunnel » représente l'ensemble des ouvrages attenants (ouvrages de têtes, stations de ventilation, cadres, passage supérieur, immeuble, etc...) en continuité de la nature souterraine du passage, la bonne gestion de celui-ci incombant à l'exploitant.

Il est donc important, pour des tunnels complexes, de définir précisément les limites de ces différentes structures, car leur inspection détaillée pourra faire appel à des spécialistes différents.

A.3. Définition des limites entre ouvrages (tunnels complexes)

Si les positions des fronts d'attaque de l'excavation sont précisément notées dans les documents relatifs au creusement, elles font référence à des PM chantier dont la matérialisation a souvent disparu une fois l'ouvrage fini. *Cette perte d'information peut poser problème quand il s'agit de recaler 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 coulés en souterrain (entièrement ou partiellement) constituent les limites du tunnel au sens strict.

Les limites entre le tunnel et les diverses structures qui peuvent le prolonger sont toujours marquées par des joints facilement identifiables.

EXEMPLES D'ASSOCIATIONS DE STRUCTURES

- Fourvière (Lyon)

Passage supérieur/station de ventilation/**tunnel**/station de ventilation/trémie avec butons.

- Front de Mer (Bastia)

Station de ventilation/**tunnel**/ouvrage de raccordement/caissons immergés/ouvrage de raccordement/tranchée couverte type cadre fermé.

- Traversée de Toulon tube Nord

Cadre fermé/station de ventilation/ouvrage de raccordement/**tunnel**/station de pompage/**tunnel**/station de ventilation/**tunnel**/ouvrage de raccordement/cadre fermé.

A.4. Spécificité des tunnels routiers

Ils doivent contenir 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 refuges et/ou des galeries d'évacuation ou de service sont réalisés.

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

Chacun de ces espaces doit faire partie de l'inspection détaillée.

A.5. Les différentes parties d'un tunnel, du point de vue de l'inspection

▶ Les têtes

Ce terme a deux significations :

- spatiale : il désigne les points d'entrée en souterrain (ex : tête nord, tête sud) ;
- structurelle : il sous-entend aussi les ouvrages spécifiques construits aux extrémités du tunnel creusé.

Plusieurs configurations peuvent se présenter :

- **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.



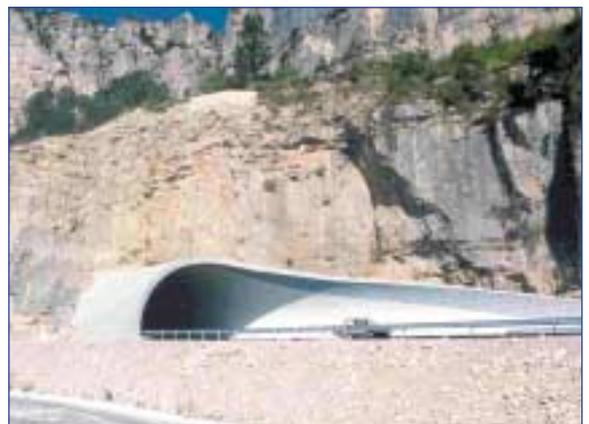
- **fausse tête** : en réponse à la remarque précédente, des constructions particulières ont été édifiées aux entrées afin de consolider le front rocheux et protéger les usagers contre des chutes de pierres éventuelles. Leur extension à l'air libre est très variable, depuis le simple mur tympan plaqué au rocher jusqu'à la fausse tête de plusieurs mètres prolongée par des murs en ailes.



Les talus des tranchées d'accès aux tunnels peuvent être revêtus (maçonnerie, béton projeté) ou laissés bruts de déroctage. 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, et si l'on suspecte quelque risque, l'intervention d'une entreprise spécialisée pourra être décidée par le gestionnaire.

- **ouvrage de tête** : il s'agit d'un véritable prolongement du tunnel, réalisé à l'air libre, sur plusieurs dizaines de mètres. La structure peut être différente de celle du tunnel. L'ouvrage de tête répond à des soucis sécuritaires, mais aussi aérodynamiques, esthétiques ou d'aménagement de surface (en milieu urbain).

Il peut être laissé à l'air libre ou remblayé (on parlera alors de tranchée couverte, quel que soit le profil intérieur adopté, voûte ou cadre).



– **station de ventilation, passage supérieur** : ce type d'ouvrage prolonge souvent les tunnels de grande longueur et fait office de « tête ». Certaines stations de ventilation intermédiaires sont construites à partir de la surface jusqu'au niveau du tunnel. Ces structures, totalement différentes, n'entrent pas dans le cadre des inspections détaillées de tunnels. L'exploitant doit alors se tourner vers d'autres prestataires spécialisés (experts en bâtiments).



▶ La section courante

Par opposition à la « tête », il s'agit de l'intérieur du tunnel sensu stricto. 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, garages, niches, abris, élargissements d'entrée.

Définitions d'ordre général ([Dictionnaire du génie civil](#))

■ Intradós

« Surface inférieure d'une voûte, d'un arc, d'une dalle » (appelée aussi sous-face dans ce dernier cas).

C'est donc la surface concave (ou plane dans le cas d'un cadre ou d'un plafond), seule visible depuis l'intérieur du tunnel et hors habillage éventuel.

En tunnel non revêtu, on parlera de la « surface de l'excavation ».

■ Extradós

« Surface convexe extérieure d'un arc ou d'une voûte appareillée régulièrement ».

« Surface supérieure d'une dalle ou d'un tablier de pont, ... ».

Pour un revêtement classique de voûte de tunnel, il est invisible. Il est parfois accessible pour des structures autostables (coques voûtées, doubles voûtes, dalles de ventilation.).

▶ Sections non revêtues

La surface déroctée est laissée à l'air libre. Ce peut être la totalité du tunnel ou seulement un ou plusieurs tronçons qui ont pu faire l'objet de confortements localisés (boulonnage).

Au cours de l'examen qui s'apparente à un levé géologique (nature des différents terrains, fracturation), on doit rechercher en priorité les zones d'instabilité rocheuses constituant un danger pour les usagers.

▶ Sections revêtues

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).

Les planches A.6. illustrent quelques profils en travers caractéristiques existant sur le réseau routier.

L'inspection détaillée va porter d'abord sur toutes les parties visitables de l'ouvrage. Chacune d'entre elles peut être le siège de désordres spécifiques. L'examen éventuel des parties non visitables devra faire appel à des techniques particulières, si le besoin s'en fait sentir.

▶ Revêtement

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

Les tôles parapluie, bardages métalliques, parements décalés (tôles, composites, préfabriqués) ne sont pas des revêtements au sens strict car ils ne font pas partie intégrante de la structure du tunnel. Quand cela est possible, l'inspecteur doit tenter d'examiner le revêtement situé à l'arrière. Sur sa demande, la dépose de tout ou partie de ces aménagements est à réaliser. Elle est à la charge du gestionnaire.

Les aménagements pour la sécurité ou l'exploitation (tels que niches, galeries, garages, abris) dont la conception et la réalisation diffèrent peu de la galerie principale sont appréhendés comme du revêtement.

▶ Radier

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

Ce 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.

▶ Chaussée

C'est l'ensemble des couches de matériaux mis en place sur le radier (naturel ou construit). La plupart des chaussées de tunnels sont des chaussées souples, mais certaines sont constituées de béton armé en continu. La chaussée se réduit à une couche de roulement posée sur des dalles en béton dans le cas de gaines de ventilation basses ou de chaussées superposées. Les appuis glissants de ces dalles peuvent être le siège de désordres particuliers.

▶ Structures internes destinées à la ventilation (ou génie civil de second œuvre)

Mises en place à l'intérieur du profil en travers du tunnel, elles matérialisent des espaces dédiés à la ventilation ; elles sont constituées par :

- les dalles (ou plafond) et leurs appuis ;
- les cloisons entre gaines ;
- les suspentes de dalles.

Ces parties d'ouvrages, généralement accessibles, sont le siège de désordres (et défauts) spécifiques.

▶ Structures particulières

Puits de ventilation.

Galeries parallèles (techniques, d'évacuation...).

Cavernes de grandes dimensions.

▶ Étanchéité du revêtement

Il s'agit des « dispositifs d'étanchéité par géomembrane » (D.E.G.) mis en place avant la réalisation du revêtement dans tous les tunnels neufs. Leur rôle est d'empêcher les eaux naturelles d'entrer en contact avec le revêtement, d'y induire des désordres ou de parvenir en partie circulée. Ils sont toujours associés à un dispositif de drainage spécifique (drain ou caniveau extradossés), définitivement masqué par le revêtement.

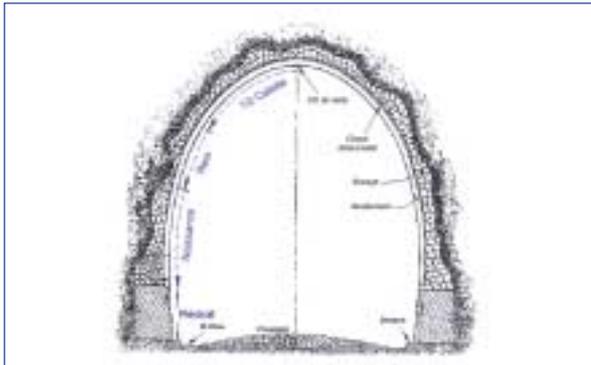
▶ Drainage du revêtement

C'est l'ensemble des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux naturelles traversant le revêtement (cas des tunnels sans étanchéité extradossés) susceptibles de favoriser une altération, de pénaliser l'exploitation. Ce sont des dispositifs le plus souvent mis en place à titre curatif depuis l'intrados dans des tunnels déjà en exploitation. Les désordres qui les affectent sont toujours clairement visibles.

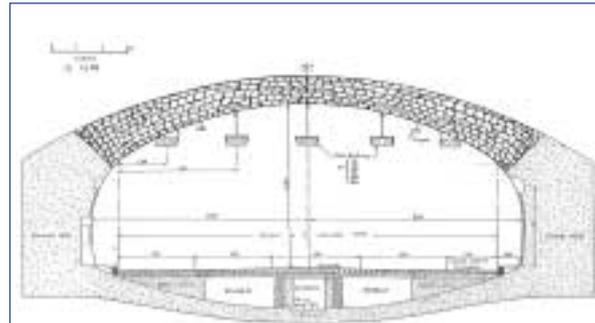
▶ Drainage et assainissement de la plateforme

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, mais aussi à la surface de celle-ci. Leur dysfonctionnement peut induire des désordres en chaussée. Leur examen ne peut se faire que par endoscopie ou ponctuellement au droit d'un regard de visite.

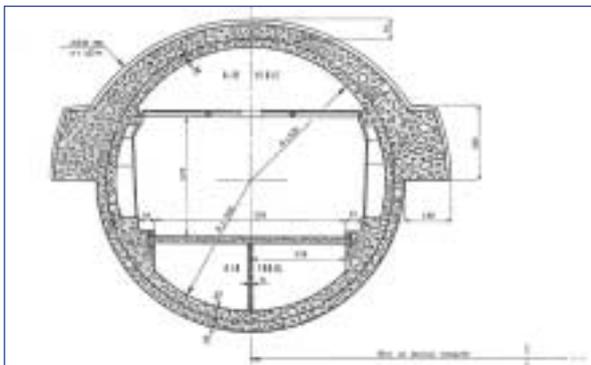
A.6. Planches : quelques profils en travers au fil des époques...



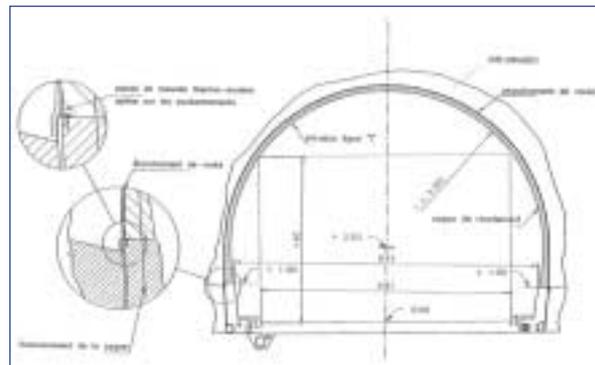
Demi-ellipse verticale, Lioran (1847)



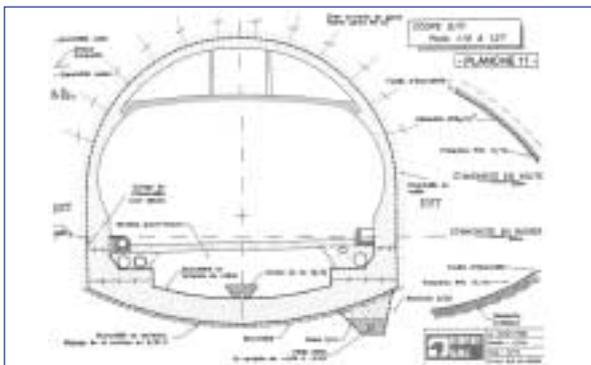
Voûte surbaissée de grande largeur, St Cloud ancien (1941)



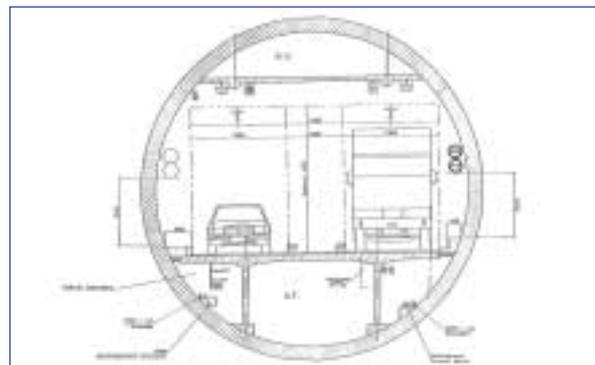
Double voûte circulaire emboîtée, Fourvière (1971)



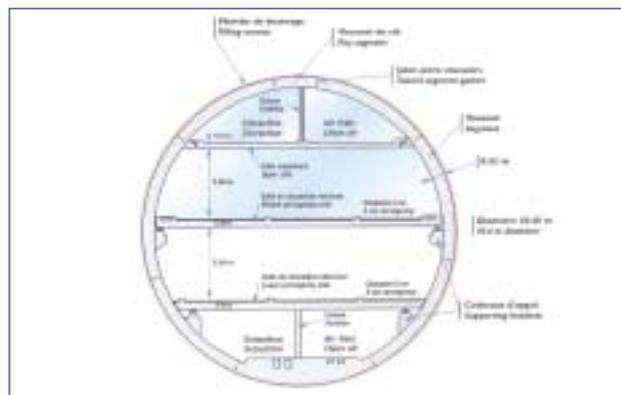
Coque autoporteuse, Fort l'Écluse (1994)



Voûte et contrevoûte + gaines, Foix (1999)



Voûte circulaire (tunnelier), Caluire (1999)



Tunnel à chaussées superposées, A86 Ouest (en construction)

Annexe 10

Le fonctionnement d'une voûte de tunnel

A.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 anciens en maçonnerie 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 n'être pas remplie en tout point du revêtement, ce qui occasionne alors des désordres.

On peut distinguer deux familles principales :

▶ *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 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 très rapidement.

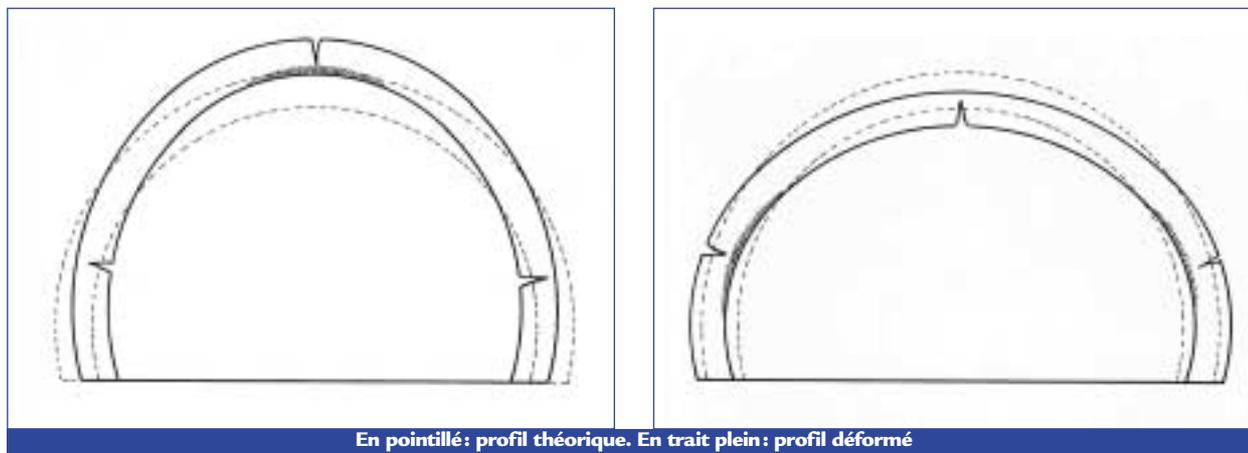
Dans tous les cas, ces désordres présentent des signes avant-coureurs, parfois discrets, qu'il faut savoir détecter.

A.2. Les situations génératrices de désordres

Elles découlent de l'enchaînement suivant :

Action du terrain --->	Déformation et contrainte --->	Désordre si : le seuil admissible du matériau (en déformation et en contrainte) est dépassé.
------------------------	--------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

Les deux schémas théoriques suivants illustrent la position des désordres spécifiques en fonction du mode de déformation du profil (ils sont repris dans la [fiche «Aplatissement-pincement»](#) du catalogue des désordres).



Fermeture du profil: des zones en compression vont apparaître au niveau de l'intrados et se manifester par de l'écaillage mécanique ([Fiches 17 et 29](#)).

Ouverture du profil: des zones en extension vont se manifester par des joints ouverts ou des fissures ([Fiches 20 et 21](#)).

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.

A.3. Les mesures

L'examen et la qualification des désordres doivent être complétés par des mesures et des essais:

- mesures de convergences relatives: les dimensions du profil en travers de la section affectée sont mesurées périodiquement afin de renseigner sur la **vitesse des déformations** (qui peut atteindre un à plusieurs mm/an pour les tunnels anciens);
- les mesures de contrainte au vérin plat permettent de connaître les **valeurs des contraintes** de compression régnant en différents points du revêtement.

Annexe 11

Analyses et caractérisation des matériaux

Sachant que l'eau est le principal vecteur des altérations, sources de désordres, son analyse doit être un des premiers réflexes.

Si la gravité des désordres est importante et si leur cause n'est pas bien cernée par l'opération précédente, on complètera la connaissance par des essais ou des analyses sur les matériaux affectés.

Cette connaissance est nécessaire pour parfaire le diagnostic et définir ensuite une réparation à caractère durable.

A.1. Analyse des eaux (consulter les recommandations AFTES)

- en cas de venues d'eau dans l'ouvrage, on commencera par rechercher les sources extérieures possibles : nappe, pluie, ruissellements et infiltrations superficielles, fuites de réseaux enterrés, ... et voir si des actions sont envisageables avec les concessionnaires ou les propriétaires ;
- des mesures de débits seront effectuées (si possible) sur une certaine durée ; leurs variations peuvent orienter vers une source possible d'alimentation. La pluviométrie sera également mesurée ou récupérée auprès des services météorologiques.

L'inspecteur peut déjà lui-même, à l'aide d'appareils simples, mesurer certains paramètres comme les débits, la température, le pH, la conductivité (qui donne une première idée sur la minéralisation quantitative de l'eau, et donc sur une origine probable) ;

- parallèlement, on fera pratiquer quelques analyses d'eaux par un laboratoire spécialisé, qui devra effectuer lui-même les prélèvements.

La détermination de base doit être systématique :

pH (si possible in situ)

TAC (titre alcalimétrique complet)

Calcium (Ca^{++})

Sels dissous (extrait sec à 105°C), conductivité

Calcul de l'index de saturation d'après Langelier Hoover, à 20°C (et 10°C)

Cette analyse décidera du caractère « incrustant » ou « dissolvant » de l'eau.

Si l'on suspecte une attaque chimique particulière, on fera déterminer :

Sulfures

Sulfates (SO_4^-)

Magnésium (Mg^{++})

et éventuellement :

Matières en suspension (quantité et nature)

Chlorures (Cl^-)

Ammonium (NH_4^+)

Oxydabilité au permanganate en milieu alcalin (présence de matières organiques)

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

Bilan ionique total

DBO5, DCO, azote total K

Si le laboratoire peut fournir son interprétation chimique, elle doit être lue à la lumière de la connaissance de l'ouvrage. L'opération peut être complexe.

Tout au plus peut-on donner quelques repères, sous forme de seuils généralement admis.

L'eau est incrustante si l'index Langelier est positif.

L'eau est agressive si :

Index de Langelier	négatif
pH	< 6.5
CO ₂ (agressif, ou libre)	15 à 30 mg/l
SO ₄ ⁻	250 à 600 mg/l
Mg ⁺⁺	100 à 300 mg/l
NH ₄ ⁺	15 à 30 mg/l
TAC (eau douce)	<= 1 meq/l
Cl ⁻	250 à 500 mg/l
Matière organique si :	
DCO > 10 mg/l	
DBO5 > 6 mg/l	
Oxydabilité au permanganate > 4 mg/l	

A.2. Analyse des mortiers et bétons

Certains des essais ci-dessous nécessitent un matériel de haute technicité et une interprétation menée par des spécialistes. La section de chimie analytique du LCPC de Paris dispose des équipements et du personnel requis.

Densité, porosité, teneur en eau.

Analyse chimique centésimale sur fraction soluble dans HNO₃.

Analyse thermique différentielle et thermogravimétrique simultanée.

Détermination des espèces minérales présentes par diffractométrie des rayons X.

Examen en microscopie électronique à balayage.

On parvient ainsi à retrouver une composition originelle de mortier ou béton, en particulier la nature du liant (chaux ou ciment). Les produits expansifs sont bien mis en évidence.

A.3. Essais sur les bétons

En laboratoire :

Ils sont le plus souvent exécutés sur carottes de sondages, moyennant certaines précautions.

On peut citer :

Profondeur de carbonatation

test à la phénol phtaléine

Alcali-réaction

test aux ions uranyle

In situ :

Sclérométrie (dureté superficielle)

A.4. Autres tests in situ

L'emploi d'acide chlorhydrique (HCl N/10) permet aussi par humectation du matériau de différencier la dolomie du calcaire (celui-ci fait effervescence, pas la dolomie), mais aussi de lever rapidement une indétermination sur la nature de certaines concrétions.

Annexe 12

Investigations 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.

En complément de la présentation des techniques qui est faite ci après, on a précisé le cadre dans lequel chacune d'elles est utilisée. Leur utilisation répond à trois types d'objectifs :

- (1). Suivre l'évolution d'un ouvrage dans le temps (auscultation métrologique) ;
- (2). Compléter une inspection détaillée afin d'établir le diagnostic final ;
- (3). Réaliser des reconnaissances complémentaires dans le cadre d'un projet de réfection.

Les mesures dimensionnelles effectuées périodiquement permettent de mettre en évidence les vitesses de déformation ou de déplacement et donc une éventuelle accélération dangereuse.

■ Fissurométrie (X, Y, Z)

(1)

Technique 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. Les appareils métalliques à sceller permettent de réaliser des mesures en XYZ sur de longues périodes et sont plus fiables. Les mesures sont manuelles (pied à coulisse) ou automatiques (centrale d'acquisition avec ou sans télétransmission) 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.

■ 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. 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.

Elles sont toujours associées à des mesures de température.

■ Convergences relatives

(1, 2)

Distancemètres à fil INVAR (Type LRPC) : la chaîne de mesure est constituée de fils en INVAR étalonnés et d'un vernier au 1/20. 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 en travers.

La précision est de l'ordre de 0.2 mm, suffisante pour un suivi de déformations.

La méthode nécessite une absence totale de circulation. Les mesures sont manuelles.

La durée de vie des repères (qui doivent être protégés) est supérieure à la décennie.

Pour connaître le déplacement de l'ensemble du profil dans l'espace, nivellement et planimétrie sont indispensables.

Distancemètres opto-électroniques : l'absence de fils tendus permet de tolérer une circulation (faible) mais aussi de se rattacher à une stabilité extérieure permettant de déduire le mouvement du profil dans l'espace.

Leur précision est légèrement moins grande que celle des distancemètres à fil.

■ Convergences absolues (ou extensométrie en forage)

(2, 3)

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 de mm.

La méthode est relativement lourde (forages carottés, scellement délicats, coût).

Elle est peu utilisée en surveillance, mais surtout dans le cadre d'études spécifiques.

■ Planimétrie

(1, 2)

Couplée avec les convergences relatives au fil INVAR et s'exercant sur les mêmes repères, elle fournit les déplacements en plan du profil. Au-delà d'une certaine longueur d'ouvrage, la précision des visées chute très vite si l'on ne dispose que de repères de stabilité extérieurs au tunnel. Elle est de ce fait très peu utilisée.

■ Nivellement relatif (1, 2, 3)

Couplé avec les convergences relatives au fil INVAR et s'exerçant sur les mêmes repères, il fournit les déplacements verticaux du profil. 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. Cette opération est relativement rapide car localisée à la zone des profils à surveiller.

■ Nivellement général (1, 2, 3)

Venant en complément du précédent, ce nivellement de précision permet de suivre les variations d'altitude du repère origine sur lequel s'appuient les nivellements relatifs. Il se rattache à des stabilités extérieures au tunnel (repères IGN par exemple) et peut nécessiter des cheminements assez longs (double cheminement avec contrôle de marche).

■ 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. Pour des orientations du dispositif selon l'un des axes principaux de déformation, on peut passer aux contraintes à travers le seul module d'élasticité. Les deux types de matériel sont les extensomètres à cordes vibrantes, et les jauges électriques, dont la résistance varie avec leur déformation. Après étalonnage, ces dispositifs peuvent fournir directement une valeur de contrainte.

■ Profilométrie par stations (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. Le pas de mesure est choisi en fonction du profil relevé et de la finesse recherchée. Une centaine de points par profils est généralement suffisante. La précision de la mesure de distance est de l'ordre de 5 mm. Cette méthode, qui est utilisée systématiquement pour le contrôle de l'excavation des tunnels en cours de creusement, permet également de vérifier le gabarit d'ouvrages existants, en vue de travaux par exemple. La distance entre profils mesurés varie de 2 à 10 m suivant l'irrégularité des objets et la précision recherchée dans l'estimation (hors profils, en profils, cubatures,...).

■ 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. Lors du déplacement régulier des antennes émettrice et réceptrice le long des profils de mesure (en général les génératrices du tunnel à plusieurs niveaux), les réflexions des ondes sur les différentes discontinuités rencontrées constituent autant d'échos sur les radargrammes, qui sont des coupes-temps (ou coupes-profondeur des structures si les vitesses de propagation sont connues). 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. Cette méthode est relativement lourde et lente (déplacement lent en nacelle, nécessité de plaquer l'antenne sur le revêtement). Son interprétation est difficile et demande à être étalonnée à l'aide de sondages. La présence d'eau est pénalisante. Son coût est relativement élevé, sachant que la méthode ne peut se substituer aux méthodes traditionnelles.

■ Scanner visible (1, 2, 3)

Cette méthode est décrite page 33.

■ Scanner thermographique (1, 2, 3)

La voie infrarouge est un système passif. Le scanner enregistre le rayonnement thermique émis naturellement par la paroi du tunnel. 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'existe un contraste thermique suffisant entre la structure et le fluide.

Il est donc évident que la pertinence et le contraste de la réponse sont fonction du moment opportun : flux thermique momentanément stabilisé et dont le sens est connu. Un suivi préalable des températures permettra de réaliser l'opération dans des conditions favorables et d'interpréter plus finement la réponse.

■ Profilométrie en continu (2, 3)

Elle peut être réalisée en même temps qu'une acquisition scanner visible ou thermographique. Elle permet d'avoir un profil géométriquement quantifié en tout point de l'ouvrage.

■ **Analyses de mortiers et bétons** (2, 3)

Elles sont décrites en annexe 11 ( Analyse et caractérisation des matériaux p. 76).

■ **Analyses d'eau** (2, 3)

Elles sont décrites en annexe 11 ( Analyse et caractérisation des matériaux p. 76).

■ **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).

■ **Sondages destructifs ou carottés** (2, 3)

Ils ne doivent être utilisés que dans les tunnels dépourvus d'étanchéité extradados.

Les sondages destructifs courts (moins de 3 mètres) 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, 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 (R.Q.D.), et de photographies en couleur.

■ **Fenêtres (surtout en ouvrages anciens)** (2, 3)

Elles sont pratiquées dans le revêtement jusqu'au contact du terrain, pour autant qu'il n'y ait aucune étanchéité extradados.

Elles permettent une observation confortable des différentes couches traversées, qui doivent alors être décrites et photographiées. Le prélèvement d'échantillons est facilité.

Elles sont de moins en moins employées, particulièrement en raison de leur coût élevé (main d'œuvre).

■ **Tranchées (tous ouvrages)** (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.

■ **Essais mécaniques sur échantillons** (2, 3)

Ils sont généralement réalisés sur échantillons intacts, ou carottes de sondages.

Toute la gamme des essais mécaniques de laboratoire peut être mise en œuvre.

■ **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 : elle permet d'accéder à la mesure de l'état de contrainte à l'intérieur du massif. Le principe repose sur l'observation des déformations induites dans la roche par un relâchement local des contraintes obtenu par surcarottage.

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)

25, avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 Bron Cedex

☎ 33 (0)4 72 14 34 00

☎ 33 (0)4 72 14 34 30

✉ cetu@equipement.gouv.fr

www.equipement.gouv.fr/cetu

