

# Gestion patrimoniale des tunnels : comment maintenir le bon état des ouvrages ?

Sébastien BOUTEILLE<sup>1</sup>, Jeanne DOREAU<sup>1</sup>, Cédric PETITCOLIN<sup>2</sup>, Didier SUBRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Etudes des Tunnels, AV. François Mitterrand, 69500 Bron, France

<sup>2</sup> GEIE Tunnel du Mont-Blanc, Plateforme Tunnel du Mont-Blanc, 11013 Courmayeur, Italie

**RESUME** Le parc des réseaux visitables, galeries techniques et tunnels est en grande majorité vieillissant. Il n'est parfois plus adapté à l'usage auquel on le destine aujourd'hui en particulier lorsque l'on intègre de nouvelles contraintes. Par ailleurs, il subit des dégradations lourdes de conséquences pour les maîtres d'ouvrage : venues d'eau, instabilités, risques de dommages au tiers... Les progrès en matière de surveillance et de suivi, de diagnostic et de travaux permettent aujourd'hui d'améliorer le choix des techniques de réparation et de réhabilitation. Un des enjeux majeurs relevant d'une gestion patrimoniale plus globale est de prendre en compte différents scénarios d'évolution temporelle des dégradations auxquelles il faut répondre pour anticiper entretien et réparation afin d'assurer un indice de performances des ouvrages adéquat à leur exploitation en sécurité. Pour le maître d'ouvrage, ces éléments de choix sont les garants d'une approche rigoureuse pour retenir une stratégie de gestion patrimoniale anticipée en fonction du contexte de l'infrastructure considérée.

**Mots-clefs** tunnels, gestion patrimoniale, diagnostic, robustesse, réhabilitation

## I. INTRODUCTION

Les ouvrages souterrains constituent parfois un réseau structuré entièrement enterré ou le plus souvent sont des ouvrages d'art ponctuels, éléments distinctifs d'une infrastructure. Dans tous les cas, ils présentent des spécificités de fonctionnement structurel et d'exploitation qui nécessitent des points d'attention particuliers. Les modes constructifs et les structures qui en découlent sont généralement considérés comme très robustes. Cette considération est confortée par une échelle de temps long pour voir apparaître et évoluer des dégradations comparativement à d'autres ouvrages d'art ou, dans le cas des tunnels routiers, des dispositifs qui les équipent. En effet, la réactivité indispensable aux enjeux d'exploitation et de sécurité immédiate des usagers conduit le plus souvent à mettre au premier plan la gestion des équipements qui présentent des durées de vie beaucoup plus courte que la structure génie civil.

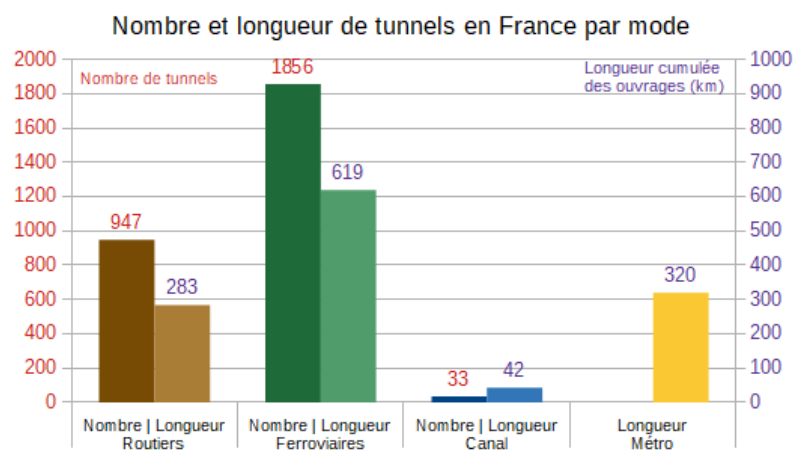
Le parc des ouvrages souterrains en France est vieillissant et fait l'objet d'un suivi et d'une surveillance encadrés. Pour maintenir un niveau de performance permettant une exploitation en sécurité, des opérations d'entretien ou de réhabilitation sont entreprises. Lorsque ces dernières ne sont pas suffisamment anticipées cela peut conduire à retarder leur réalisation et prendre en compte des évolutions de dégradation plus importantes avec des difficultés techniques accrues

ainsi qu'une augmentation des délais de traitement et des coûts de travaux. Le montage de ces dossiers complexes nécessite par ailleurs d'intégrer le contexte socio-économique et politique ainsi que les contraintes trafic incluant les reports de circulation afin d'établir les contraintes d'exploitation de l'infrastructure.

Après avoir présenté le parc des ouvrages souterrains en France et ses caractéristiques principales, cet article définira les grands principes d'établissement d'une politique de gestion patrimoniale et quels en sont les bénéfices pour les maîtres d'ouvrage. Enfin, la démarche de maintenance et de réhabilitation sera abordée de manière générale et explicitée au travers du cas des travaux de réhabilitation de la voûte du tunnel du Mont-Blanc.

## II. PARC D'OUVRAGES SOUTERRAINS EN FRANCE

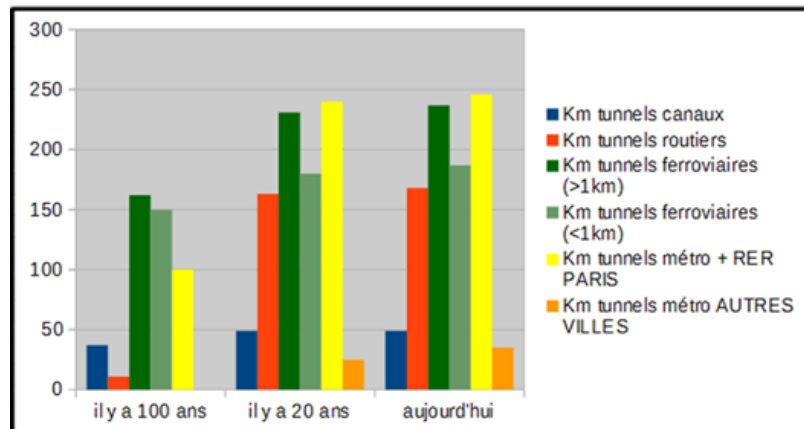
Le patrimoine français des ouvrages souterrains est diversifié, étendu et recouvre de nombreux domaines d'activité. Tous domaines confondus, le parc des ouvrages souterrains en France représente environ 10 000 km d'ouvrages qualifiés de visitables (e.g. d'un diamètre supérieur ou égal à 1,20 m), pour une valeur estimée à 120 milliards d'euros. Il faut noter que les ouvrages d'adductions d'eau et d'assainissement représentent la moitié de ce linéaire et les galeries hydro-électriques environ 1 500 km. Les caractéristiques en nombre et longueur cumulée des tunnels du domaine des transports routier, ferroviaire (source J-C Daumarie, 2010), voie navigable et métro y compris RER Parisien, sont détaillées dans la figure 1 ci-dessous.



**FIGURE 1.** Répartition des tunnels du domaine des transports en France au 1er janvier 2023 (données sources issues de l'observatoire du CETU)

Ce parc est toujours en pleine évolution avec le Grand Paris Express qui met en place 4 nouvelles lignes au travers d'environ 160 km de tunnels creusés et 68 gares connectés à l'actuel réseau métropolitain. On peut également noter des projets d'envergure comme le chantier de construction du tunnel de base Lyon-Turin (TELT) de 57 km à 2 tubes pour traverser les Alpes.

Pour compléter cet état des lieux, il est important d'introduire la période de construction de ces ouvrages. En effet, dans le cas des voies navigables, 32 tunnels canaux représentant un linéaire de 37 km ont été construits entre 1680 et 1910 soit près de 90% de l'infrastructure actuelle existante. A contrario, dans le cas de tunnels routiers, la grande majorité des ouvrages a été creusée au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle comme illustré sur la figure 2. Les dates de construction, présentées dans la figure 2 traduisent un vieillissement plus ou moins important du parc en fonction du domaine concerné.



**FIGURE 2.** Répartition des tunnels du domaine des transports en France au 1er janvier 2023 (données sources issues de l'observatoire du CETU)

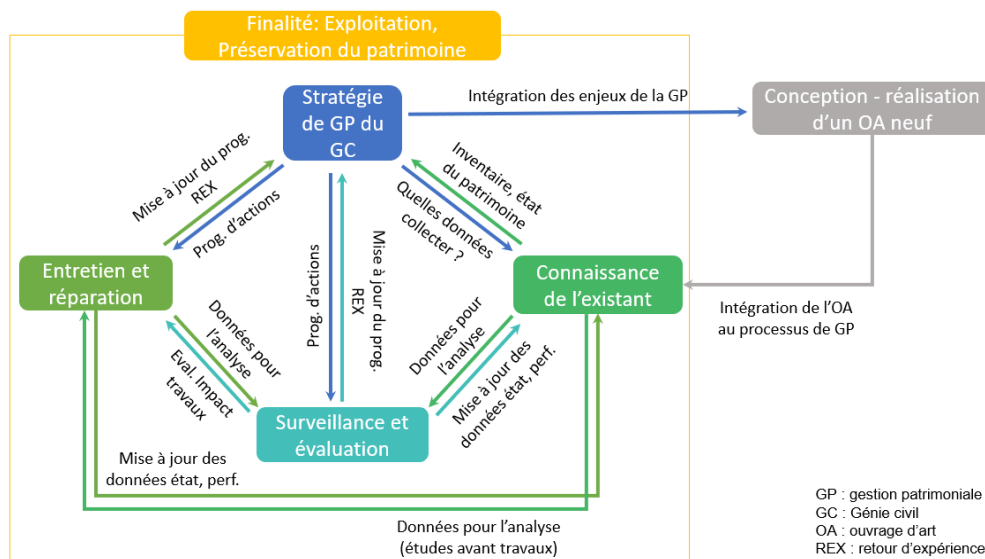
Le parc des ouvrages souterrains français est vieillissant et nécessite un maintien en état qui revêt des enjeux considérables en termes de sécurité, d'économie, de risque juridique ou encore de respect de l'environnement.

### III. GESTION D'UN PARC D'OUVRAGES

Au même titre que d'autres ouvrages, les tunnels sont des actifs économiques matériels, c'est-à-dire qu'ils constituent tout ou partie des éléments de l'infrastructure qui génèrent une ressource (source Orcesi, 2008). Selon les cas, cette ressource peut être directe via un péage ou indirecte via la favorisation de l'attractivité et de la croissance économique d'un territoire. La norme ISO 5500 publiée en 2014 définit la gestion des actifs comme « les activités coordonnées d'un organisme dans le but de générer de la valeur à partir d'actifs ». Ces activités sont à considérer au sens large : e.g., définition d'une politique, définition de plans d'investissement, connaissance et suivi des actifs, définition des rôles et responsabilités des acteurs. En ce sens, la gestion de patrimoine tunnels peut être assimilée à l'ensemble des activités mises en œuvre par les gestionnaires pour gérer leurs tunnels de façon à en tirer tout le bénéfice au profit des usagers, des territoires et de leurs propres objectifs financiers.

Pour les tunnels, les principaux volets d'une démarche de gestion de patrimoine sont présentés dans la figure 3 qui reprend les termes couramment employés pour le génie civil. Cette démarche cyclique et continue est valable quels que soient le gestionnaire et le réseau. Cependant,

la déclinaison de chaque étape est à adapter en fonction du contexte du réseau et du tunnel. La description détaillée de la démarche est disponible, par exemple, dans les recommandations du GT14 de l'AFTES sur la « Méthodologie d'aide à la gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages souterrains » (2013), le guide de l'IDRRIM « L'ingénierie de gestion patrimoniale appliquée aux infrastructures routières » (2021), la notice IMGC « Le pilotage de la maintenance des ouvrages d'art en béton » Livre 1 (2021) et le Manuel de la Gestion du patrimoine routier de l'AIPCR (2022). Le cas particulier de l'amélioration de la démarche engagée par la RATP est développée dans le mémoire de thèse de A-P Hidalgo (2015).



**FIGURE 3.** Processus de gestion patrimoniale (source J.D. Malioche, 2023)

Le maître d'ouvrage, doit orienter et définir les objectifs stratégiques de gestion patrimoniale et, in fine, le niveau d'acceptabilité des risques à prendre en compte pour assurer la sécurité des personnes et des biens, maintenir la conformité réglementaire, garantir le bon fonctionnement et la pérennité des ouvrages. En tant que gestionnaire, il doit donc disposer d'une méthode de gestion organisée qui intègre l'ensemble de la problématique telle que présentée dans la figure 3 pour rationaliser ses choix de programmation et légitimer ses budgets. Ce schéma détaille les flux d'échange d'information entre les différents volets de la gestion patrimoniale.

Cette organisation débute dès la construction de l'ouvrage pour alimenter la connaissance de l'existant avec l'établissement du dossier d'ouvrage qui doit en particulier intégrer le rapport d'inspection détaillée initiale pour obtenir un état de référence avant transfert du dossier vers le gestionnaire exploitant. Par la suite, de nombreuses données sont acquises à chaque étape de la vie d'un tunnel : mesures d'instrumentation, rapports d'inspection, données trafic, etc. Ces données peuvent avoir divers usages nécessitant un niveau de granularité variable selon l'acteur concerné, par exemple, faciliter les échanges entre différentes parties-prenantes, fournir les

éléments de base à un processus de décision, préparer une intervention dans l'ouvrage ou encore alimenter une expertise. Or, les données récoltées sont nombreuses, hétérogènes et proviennent de sources diverses. Il est donc souvent difficile pour un gestionnaire de les conserver de façon structurée, de les fiabiliser et de les mettre régulièrement à jour afin de pouvoir pleinement les exploiter au service de la gestion de patrimoine. Par ailleurs, les interfaces entre acteurs aux différents stades de la vie d'un ouvrage constituent souvent des points critiques associés à une perte d'information pouvant avoir des conséquences directes sur la gestion de l'ouvrage, voire sur l'ouvrage lui-même. Comme cela sera développé dans le paragraphe suivant, la gestion des données, i.e. de la connaissance de l'ouvrage, sur le long terme est un prérequis indispensable au maintien en bon état des ouvrages.

#### IV. MAINTIEN DES PERFORMANCES DANS LE TEMPS

La figure 4 introduit la notion de maintien dans le temps de la performance des ouvrages de génie civil qui recouvre l'aptitude de l'ouvrage à remplir les fonctions de résistance mécanique et d'usage. En-dessous d'un seuil minimal admissible de performance, l'ouvrage n'est plus apte à être exploité. Cette performance, clé de voûte de la gestion patrimoniale, nécessite d'une part d'évaluer l'état de l'ouvrage au travers du suivi et de la surveillance dont l'organisation est généralement encadrée au sein du domaine concerné. Ces démarches disponibles par ailleurs comme l'ITSEOA (source ITSEOA, 2010) pour la surveillance des ouvrages d'art routiers et plus particulièrement du Fascicule 40 pour les tunnels (source Guide d'application ISTEAO fascicule 40, 2012), ne seront pas développées dans cet article. Il est également loisible d'introduire des éléments de robustesse des ouvrages dans la démarche. Toutefois, ces concepts sont rarement appliqués sur un niveau opérationnel car le nombre d'ouvrages rend délicat le regroupement des tunnels par typologie permettant de réaliser des analyses de fiabilité.

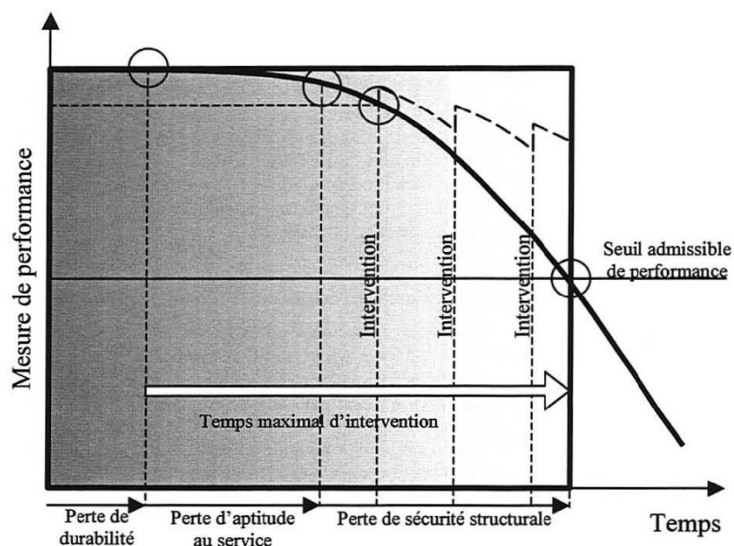
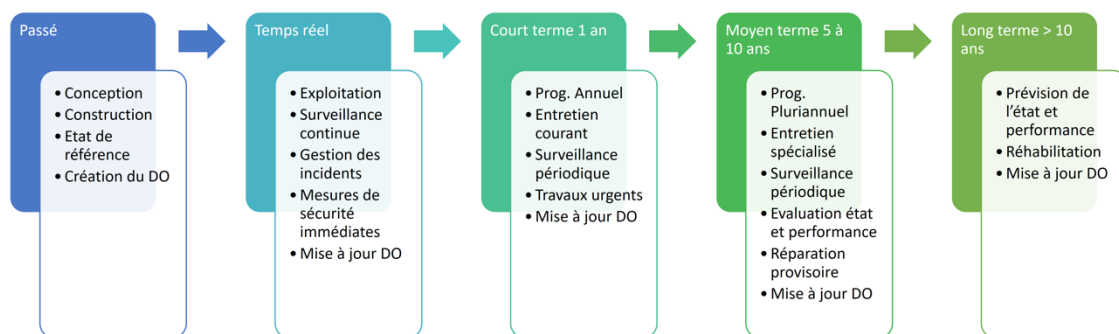


FIGURE 4. Evolution de la performance d'un ouvrage dans le temps (source Cremona, 2003)

D'autre part, le niveau de performance doit être maintenu dans le temps afin de ne pas se dégrader en-deçà d'un seuil admissible. Pour cela, des interventions d'entretien courant et d'entretien spécifiques sont indispensables. Elles comprennent la maintenance des équipements de génie civil dont les plus courants sont les systèmes de drainages et d'assainissement, mais également des réparations localisées sur les structures d'un tunnel généralement mises en évidence par les actions de surveillance. La performance est également dépendante de deux paramètres majeurs impactant les structures principales et secondaires de génie civil d'un tunnel. D'une part, la robustesse de construction, e.g. le mode de construction, aléas et défauts de réalisation, résilience du fonctionnement structurel, matériaux constitutifs, etc., peut limiter la période précédant la première baisse de performance. Dans le cas du génie civil, cette baisse est essentiellement induite par le vieillissement des matériaux, lié aux conditions d'exposition et par les interactions sol-structure liées à la géotechnique et au fonctionnement hydrogéologique du massif encaissant. D'autre part, les événements accidentels peuvent également dégrader ponctuellement la performance et conduire dans les cas extrêmes, comme celui d'un incendie majeur, à des restrictions d'exploitation voire à la fermeture immédiate de l'ouvrage.

Les opérations d'entretien courant, spécifique ainsi que les réparations localisées sont généralement programmées à échéances régulières par le gestionnaire et sont intégrées dans les contraintes d'exploitation à court et moyen terme. Les dégradations liées à un événement accidentel ne peuvent pas être anticipées et sont à gérer au cas par cas. Une des problématiques majeures du maintien de la performance réside donc dans l'évaluation de la dégradation du fonctionnement structurel et de son évolution dans le temps qui vont inéluctablement conduire à des opérations de réparation ou de réhabilitation conséquentes. Les constructions en milieu souterrain sont généralement robustes et la dégradation de la performance nécessite la prise en compte d'une échelle de temps long. Toutefois cette connaissance est indispensable pour conserver une marge d'anticipation suffisante lorsque des travaux d'envergures sont in fine à envisager (Cf. figure 5). En effet, ces opérations de réhabilitation sont généralement peu compatibles avec une exploitation sans fortes restrictions voire fermeture et peuvent devenir difficilement acceptables sur un plan économique et politique.



**FIGURE 5.** Problématique temporelle de suivi d'un ouvrage (D.O. – Dossier d'Ouvrage)

Afin de répondre au mieux à l'ensemble de la problématique de la gestion patrimoniale, on distingue trois niveaux fonctionnels au sein de la maîtrise d'ouvrage. Le niveau opérationnel au sein du service d'exploitation chargé de la surveillance courante et des opérations d'entretien courant, spécifique et des réparations localisées. Le niveau organisationnel pris en charge par le service technique ou ingénierie qui organise les opérations de contrôle, de surveillance, d'inspection ainsi que les réparations et réhabilitations. Et enfin un niveau décisionnel assuré par le service de direction. Les conditions de réussite d'une politique de gestion patrimoniale reposent sur la fluidité des échanges transversaux entre ces trois niveaux fonctionnels afin que la démarche qui repose sur les quatre étapes successives suivantes soit mise en œuvre :

- Identification du patrimoine : caractéristiques intrinsèques, sa criticité et les facteurs susceptibles d'influencer son état ;
- Connaissance de son état et de la temporalité de son évolution ;
- Evaluation des risques qui pèsent sur sa sécurité et sur son environnement, et les conséquences humaines et financières d'une défaillance ;
- Mise en œuvre des opérations de maintenance et de réhabilitation intégrant les paramètres précédents dans la prise de décision permettant de proposer des choix argumentés et de définir des priorités d'actions en fonction des objectifs préalablement définis.

Dans ce cycle de vie de l'ouvrage, un sous-entretien par un manque ou report d'investissement nécessite alors des coûts de rattrapage du retard pris dans l'entretien. Le coût final est alors évalué en moyenne à 3 ou 4 fois la somme des investissements consentis pour un entretien régulier (source IDRRIM, juin 2019). Cette augmentation de la dépense est une « charge d'intérêt » définie comme une « dette grise » parce qu'invisible (source Livre blanc de l'IDRRIM, octobre 2014).

La démarche de réhabilitation d'un ouvrage trouve sa source dans les préconisations issues du suivi et de la surveillance, ou de défaillance inattendue. Cette démarche peut également être initiée par la nécessité d'une mise en conformité ou d'une modernisation de l'ouvrage ou du parc d'ouvrages considérés.

Quelle que soit l'origine de la réhabilitation, il est important que le maître d'ouvrage établisse en amont un programme de l'opération. Ce programme est le garant de réflexion préalable formalisant les objectifs, les contraintes et les exigences retenus par le maître d'ouvrage et sera le fil conducteur tout au long du déroulé de l'opération. Il peut être élaboré suivant le cadrage donné par l'Instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national (2017), adapté au cas d'une réhabilitation.

En effet, dans le cas d'une réhabilitation, il est nécessaire de dresser un bilan de la connaissance de l'ouvrage et de poser un diagnostic sur son état. C'est une étape indispensable pour garantir l'adéquation de la réparation mise en œuvre au problème à traiter. Le diagnostic permet, le cas échéant, d'alerter le maître d'ouvrage et de l'informer sur la nature et le degré d'urgence des travaux à entreprendre. Il peut conduire à l'adaptation du niveau de surveillance de l'ouvrage (e.g. surveillance renforcée jusqu'à l'aboutissement des travaux) et à la mise en

œuvre de mesures de sécurité voire de mesures de sauvegarde à plus ou moins court terme (e.g. fermeture de l'ouvrage, étaitements provisoires). Pour les tunnels revêtus, le diagnostic doit être géotechnique et structural afin de tenir compte de l'interaction entre le revêtement et le terrain encaissant. La démarche générale de diagnostic se décline de la manière suivante :

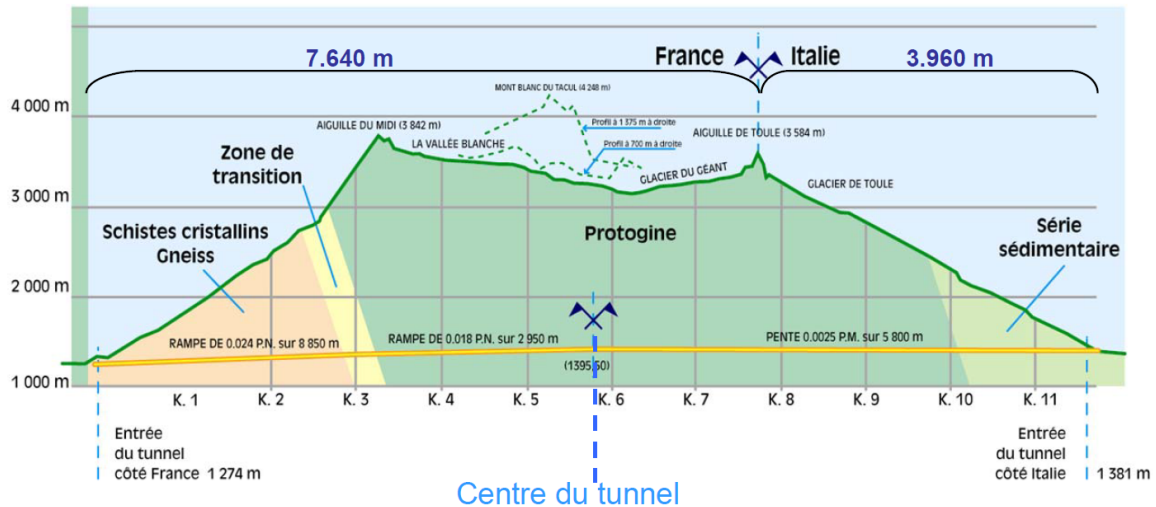
- Etat des lieux des données relatives à la construction et à la vie de l'ouvrage disponibles dans le dossier d'ouvrage (ex. géologie, conception, résultats de la surveillance, travaux de réparation passés) ;
- Analyse croisée et synthétique de ces données ;
- Réalisation, si nécessaire, d'investigations complémentaires et/ou d'études par le calcul afin d'améliorer la connaissance de l'ouvrage et la compréhension du fonctionnement de la structure (revêtement + terrain encaissant) et/ou de la pathologie à traiter ;
- Conclusion du diagnostic.

Les opérations de réhabilitation ont des objectifs de confortations structurelles, de traitement de venues d'eau ou encore d'augmentation de niveau de sécurité et de service. Ces deux derniers points peuvent induire des travaux structurels lourds comme une rectification de la géométrie de la section intérieure du tube. L'avant-projet de réparation d'ouvrage d'art (APROA) permet alors sur un plan technique de sélectionner les méthodes potentielles de réalisation avec, le cas échéant, la prise en compte parfois complexe de la gestion et de la programmation à établir lorsque les travaux sont entrepris sous exploitation.

## V. TRAVAUX SUR LA DALLE DE CHAUSSEE ET LA VOUTE DU TUNNEL DU MONT-BLANC

### Présentation générale du tunnel du Mont-Blanc

Le tunnel du Mont-Blanc est un tunnel routier binational, d'une longueur de 11,6 km, qui relie Chamonix-Mont-Blanc, en France, à Courmayeur, en Italie. Il possède un système de ventilation transversale avec des gaines d'air frais et d'air vicié dont le nombre varie selon l'éloignement aux têtes, localisées sous la chaussée. L'ouvrage est doté de nombreux ouvrages connexes pour la sécurité d'exploitation, notamment : 1 poste de secours situé au centre du tunnel, 36 abris sur le piédroit reliés aux gaines sous chaussée par l'intermédiaire d'escaliers, 36 garages répartis également sur les deux piédroits et 18 galeries de retournement (Cf. figure 7).



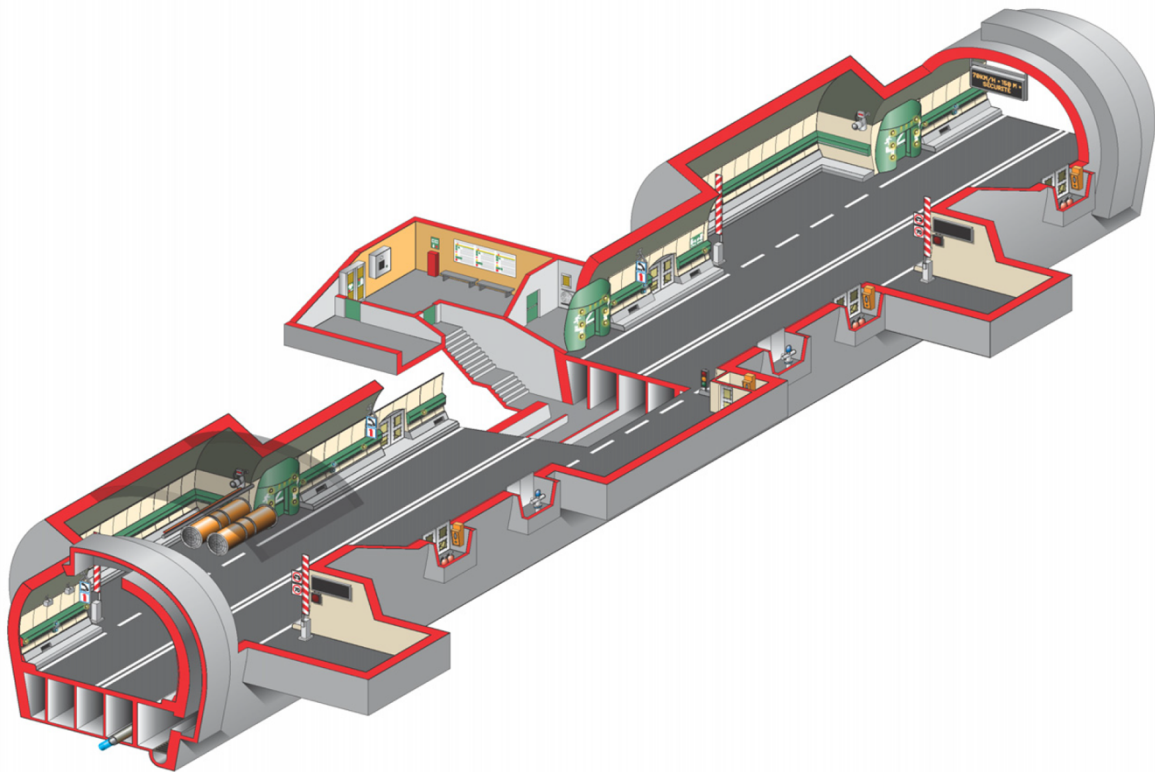
**FIGURE 6.** Profil en long du tunnel du Mont-Blanc dans son contexte géologique (source Dossier de Sécurité du tunnel du Mont-Blanc – 2019)

Le tunnel a été creusé au sein du Massif du Mont-Blanc, en méthode conventionnelle, à l'explosif, entre 1959 et 1962, pour une mise en service en 1965 (sources Guichonnet 1963, Panet 1969). Il est entièrement revêtu en béton non armé, sans dispositif d'étanchéité. Le tunnel du Mont-Blanc est un ouvrage de plus de 60 ans, au contexte environnemental particulier :

- Ouvrage à grande profondeur avec une couverture qui peut atteindre 2 500 m ;
- Conditions hydrogéologiques qui évoluent avec la fonte du pergélisol (Gudéfin 1967);
- Atmosphère particulièrement agressive dans les zones de têtes (grande amplitude thermique, sels de déverglaçage).

Cet ouvrage a été marqué par l'incendie du 24 mars 1999, suivi de lourds travaux de réhabilitation et de modernisation jusqu'en 2002 avec notamment le rétablissement de la voûte située au droit de la zone incendiée (source C. Aubert 2002).

Dans ce contexte, le tunnel fait l'objet d'une politique de surveillance incluant de nombreuses actions d'inspection et de mesures par instrumentation. En parallèle, depuis quelques années, des opérations d'investigations et de diagnostics ont été engagées afin d'étudier la nécessité de remplacement de la dalle de chaussée et de réhabilitation du revêtement de la voûte à moyen et long terme : e.g. études prospectives sur la capacité résiduelle de la dalle et du revêtement, campagnes d'investigations, étude hydrogéologique.



**FIGURE 7.** Schéma des structures principales et annexes du tunnel du Mont-Blanc

### Un contexte spécifique de gestion binationale

Le Tunnel du Mont-Blanc est un ouvrage concédé aux sociétés concessionnaires autoroutières ATMB pour la partie française et SITMB pour la partie italienne, majoritairement détenues par des capitaux publics. Il est géré par une structure unique d'exploitation depuis 2002, le Tunnel du Mont-Blanc - GEIE (TMB-GEIE). Il s'agit d'une structure franco-italienne de droit communautaire qui collecte les péages pour le compte des deux sociétés concessionnaires et a la responsabilité de l'entretien et de l'exploitation du tunnel et de ses dépendances, ainsi que de la sécurité et de la gestion du trafic. Il assure enfin, pour le compte d'ATMB et de SITMB, la maîtrise d'ouvrage des travaux de maintenance et d'amélioration de l'infrastructure et de ses équipements.

Une commission intergouvernementale (CIG), composée de représentants des ministères de tutelle français et italien, établit les orientations générales du Tunnel et définit sa politique de gestion. C'est elle qui approuvera le programme de réhabilitation. La commission est assistée par un comité de sécurité (COMSEC), composé d'experts consultés sur toutes les questions relatives à la sécurité de l'ouvrage et de son exploitation.

Ce contexte binational particulier complexifie la gestion patrimoniale de l'ouvrage, notamment par l'existence d'exigences réglementaires pouvant être très différentes en France et en Italie.

### **Contexte, programme de réalisation des travaux**

Comme présenté ci-dessus, cet ouvrage exceptionnel est soumis à des conditions environnementales d'exposition sévères et a subi l'impact direct d'un violent incendie en 1999. Lors de sa construction en 1965, il n'était pas d'usage de mettre en place une étanchéité à l'extrados du revêtement ce qui limite les agressions directes sur le béton en place. Au cours du temps les désordres et pathologies sur le béton et les aciers sont en constante progression et les réhabilitations avant celles présentées ci-dessous limitées à un tronçon de voûte suite à l'incendie de 1999.

Le suivi et la surveillance de cet ouvrage a conduit à de nombreuses investigations et diagnostics. Seuls les éléments notables pour les travaux présentés seront mentionnés dans la suite de cet article. Actuellement, des investigations à l'Université de Bergame sont toujours en cours sur l'état de dalle afin d'évaluer l'évolution de l'étendue des dégradations. L'université Polytechnique de Turin mène des études sur l'état de la voûte et son évolution possible avec la prise en compte d'un contexte d'interaction sol-structure. Ces études permettront au maître d'ouvrage de prendre des décisions éclairées en termes de gestion patrimoniale qui doivent intégrer un bon état attendu pour la fin de concession actuellement programmée en 2050.

Enfin, il faut également que la programmation des travaux d'investissement intègre une possible flexibilité. On relève par exemple qu'à la suite des éboulements survenus le dimanche 27 août 2023 en Maurienne, l'A43 et le tunnel du Fréjus étant fermés, les travaux envisagés à compter du 4 septembre dans le tunnel du Mont-Blanc ont été reportés. Cette décision a été prise par les États français et italien, réunis en Commission Intergouvernementale, en accord avec les Préfectures de la Haute-Savoie et de la Région Autonome Vallée d'Aoste. Le TMB-GEIE a reprogrammé fin 2023 les opérations de maintenance technique, notamment des travaux concernant le remplacement d'éléments de dalle dans la portion centrale du tunnel, nécessitant la fermeture totale de l'ouvrage durant 9 semaines.

### **Travaux sur la dalle de chaussée**

Le tunnel du Mont-Blanc présente la particularité d'avoir les gaines de ventilation d'air frais et d'air vicié sous une dalle de chaussée supportant le trafic de transit. Cette double fonctionnalité de la dalle de chaussée est indispensable pour assurer l'exploitation en toute sécurité :

- Garantir l'efficacité de la ventilation du tunnel en fonctionnement normal mais aussi en cas d'incendie ;
- Garantir la bonne tenue de la chaussée sous charge de trafic.

Dans le cadre de la surveillance et du suivi de l'ouvrage, des investigations dédiées de cette partie d'ouvrage ont été conduites en 2013. Elles ont mis en exergue, dans des zones bien localisées, des pathologies du béton armé et en particulier l'éclatement du béton et la corrosion remarquable des aciers qui réduisent la quantité de matériaux contribuant à la résistance de la structure. La présence non négligeable de sulfates, en plus des chlorures transportés par l'eau depuis la chaussée, induit quant à elle une détérioration progressive très importante des

propriétés mécaniques du béton. De manière générale, l'hétérogénéité des caractéristiques mécaniques du béton constatée sur les prélèvements, semblent correspondre à la différence de qualité entre les bétons préfabriqués et les bétons coulés en place.



**FIGURE 8.** Investigations dans les gaines d'air frais et air vicié : identification des zones de corrosion des aciers induisant un éclatement du béton dans la dalle de chaussée

Il faut également noter une zone où la présence de chlorure était relevée avec une teneur dix fois supérieure au seuil admissible. L'hypothèse la plus plausible étant que ces chlorures proviennent de l'incendie en 1999 d'un camion transportant des matériaux plastiques composés de polychlorure de vinyle qui en brûlant à proximité du garage n°20 aurait rejeté des particules de chlorures.



**FIGURE 9.** Pont de levage assurant la mise en place de 4 éléments préfabriqués de remplacement de la dalle détériorée en une nuit de travaux

Le remplacement des parties de dalle les plus dégradées a donc été étudié pour aboutir à une première phase de travaux en 2018, qui ont permis de remplacer 556 m de dalle sur la zone la plus dégradée par une dalle neuve constituée de 222 éléments préfabriqués. Des travaux préparatoires ont permis de déposer les équipements dans la partie circulée et de préparer de nuit les tronçons de chaussée à déposer (rabotage, sciage des têtes de cloisons, etc.). Le phasage de remplacement des dalles a permis, après une nuit de travaux, une réouverture à la circulation dès 6h du matin, associé à des créneaux de 30h continus certains week-ends. Les travaux de remise en place des équipements ont été réalisés en troisième phase.

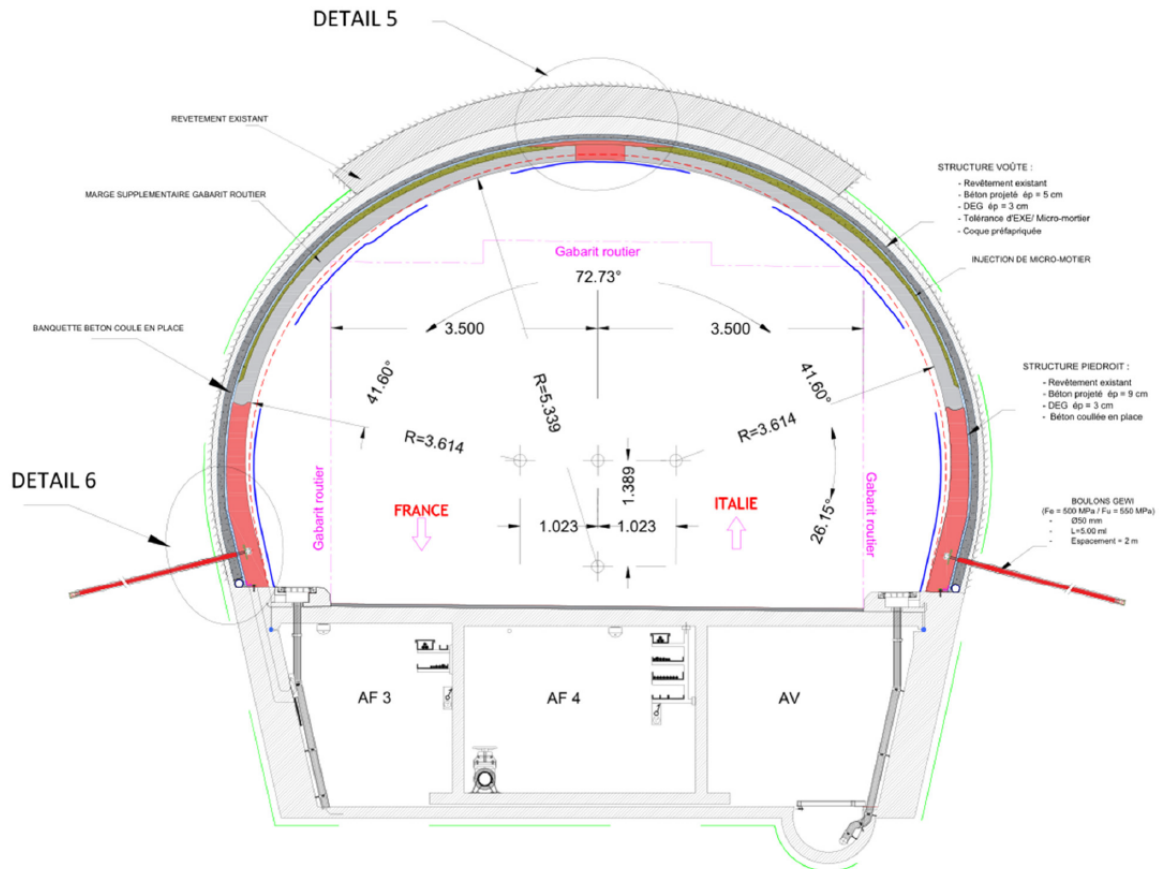


**FIGURE 10.** A gauche, les équipements indispensables à la décontamination pour les travaux en présence d’amiante. A droite, travaux de remplacement de la dalle de chaussée

Sur un linéaire total de 1100 m, consécutif de part et d’autre au tronçon traité en 2018, la dalle a également été remplacée de 2021 à fin 2023 avec des travaux basés sur les mêmes principes. Il faut toutefois noter qu’entre ces deux périodes, la découverte d’amiante dans certaines parties des structures du génie civil ont nécessité des phases de désamiantage réalisées sous SAS étanches par des entreprises spécialisées. Ces travaux n’ont pas permis, comme en 2018, une réouverture systématique à la circulation en raison des dispositifs de gestion et des SAS de décontamination mis en place.

### Travaux sur la voûte

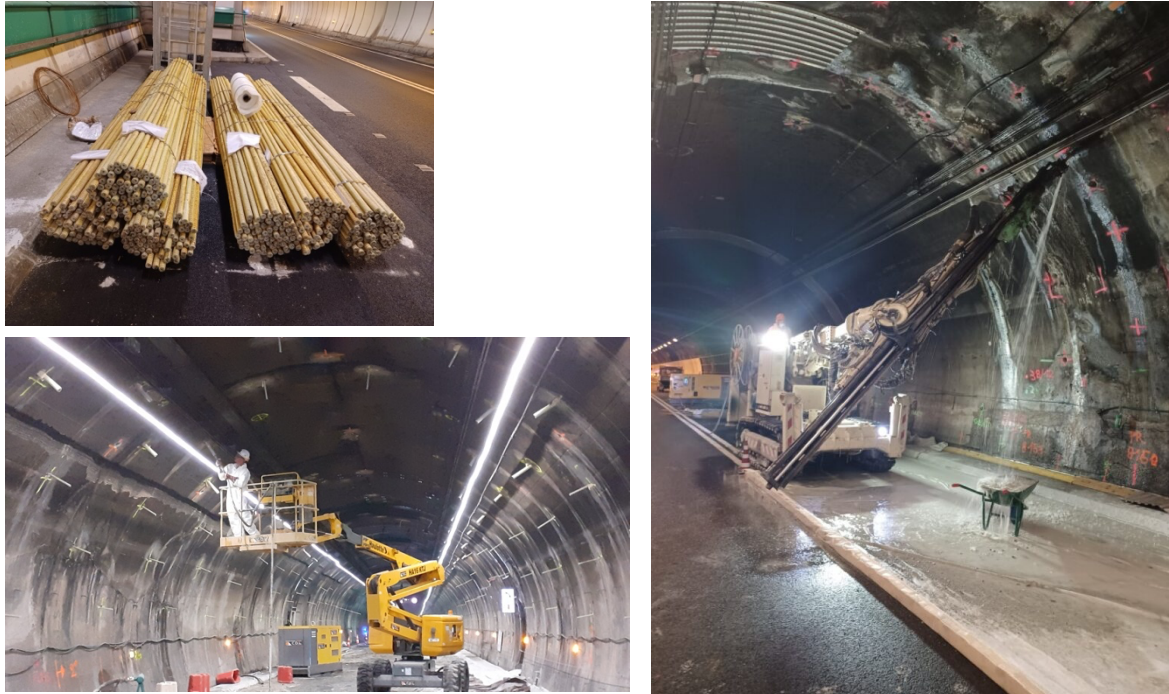
De même que pour la dalle de chaussée, la voûte du tunnel du Mont-Blanc a fait l’objet de nombreuses investigations. Le revêtement de la voûte est la structure dite principale de l’ouvrage, car il participe à la stabilité générale de l’ouvrage avec un fonctionnement en interaction avec le terrain encaissant. La figure 7 présente les différentes sections du revêtement de cette voûte comme les zones de garage, les aires de retournement, les accès aux refuges et aux niches de sécurité ou encore les carneaux d’extractions. Ces singularités induisent la prise en compte de considérations particulières lors du suivi et de la surveillance mais elles sont autant de difficultés pour la conception et réalisation de travaux standardisés sur un linéaire important.



**FIGURE 11. Réhabilitation du revêtement de la voûte – section courante**

Dès 2005, un rapport établissait un programme d'investissements et de grosses réparations programmées sur 50 ans pour le renouvellement des ouvrages de génie civil et des installations du tunnel du Mont-Blanc. Une étude menée par l'entreprise RockSoil en 2017 a permis de définir un indice qualifiant l'état du béton constitutif de la voûte. Cinq paramètres sont pris en compte dans cet indice : l'épaisseur du revêtement, la qualité du béton, la fissuration, les altérations et les venues d'eau.

Quatre zones ont été retenues dans le PFD (programme fonctionnel détaillé) finalisé par le GEIE-TMB en 2020, pour faire l'objet de travaux tests pour un linéaire total à rénover de 1200 m sous un format de marché conception-réalisation. Le choix des zones est basé d'une part sur ce diagnostic et d'autre part sur le fait qu'ils constituent une première approche d'une opération de réhabilitation qui devra ensuite être reproduite et étendue sur tout ou partie du tunnel.



**FIGURE 12.** Boulonnage provisoire : boulons avant pose (en haut à gauche), implantation et forage dans le revêtement (à droite), injection (en bas à gauche)

Le groupement mandataire a prévu les phases macro pour aboutir à la réhabilitation telle que représentées dans la figure 11, la géométrie initiale de l'intrados du revêtement est conservée pour maintenir un gabarit routier identique :

- *Dépose de l'épaisseur du revêtement à remplacer* : si nécessaire, boulonnage provisoire, rabotage de la structure existante et dépose des boulons et cintres de soutènement provisoires de 1965 en interface avec l'épaisseur de rabotage ;
- *Traitement interface avec le futur revêtement* : béton projeté de sécurisation avec fibres polypropylènes, boulonnage définitif en piédroits et étanchéité de type géomembrane ;
- *Réalisation du nouveau revêtement* : ferrailage et bétonnage des piédroits (« banquettes »), pose en quinconce, réglage, clavage des coques préfabriquées en béton armé, injection du vide à l'arrière par micro-mortier.

Les carneaux et intersections garage/galerie seront ensuite traités en béton projeté, et les niches de sécurité à l'aide de béton coulé en place.

Les travaux de fermeture fin 2023, pour finaliser les travaux sur la dalle, ont permis de réaliser les actions préparatoires à la réhabilitation de la voûte en 2024 et 2025, avec la mise en place d'environ 1.150 tiges d'ancrage provisoires en fibre de verre de 5 mètres de long, la réalisation de carottages profonds et la dépose de la sous-structure du revêtement des parois (Cf. figure 12).



**FIGURE 13.** Parements préfabriqués : coffrage (à gauche) – transport (à droite)

Ces interruptions de circulation sont également l'occasion de réaliser des interventions liées à la surveillance et la maintenance, comme l'enlèvement d'environ 6 500 m<sup>2</sup> d'élément couvrant, afin d'ausculter les parties de la structure du tunnel protégées par des tôles.

## VI. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Cet article concerne le parc des ouvrages souterrains français diversifié sur les domaines du transport routier, ferroviaire ou guidé. La majorité de ces ouvrages sont anciens et sont très souvent des points singuliers au sein de l'infrastructure ou du réseau concerné. Ce sont donc des objets sensibles, sujet à enjeux multiples en fonction du contexte du domaine concerné. Les maîtres d'ouvrage gestionnaires-exploitants ont pour ambition de maintenir un niveau de performance suffisant pour les exploiter en toute sécurité. Cela requiert la prise de décisions éclairées en termes de gestion patrimoniale. Cet éclairage provient de la connaissance de l'état de l'ouvrage et du caractère évolutif de cet état mais aussi de l'anticipation des possibilités d'intervention, qui peuvent se trouver très contraintes lorsque l'ouvrage doit rester partiellement exploité sous chantier. Ainsi parmi les compétences d'analyse doit figurer la capacité de hiérarchiser la priorité des variantes d'entretien sur la base du coût sur la durée de vie des actifs afin d'évaluer et de stabiliser la potentielle dette grise.

Le cas du tunnel du Mont-Blanc nous démontre tout l'intérêt des investigations et diagnostics complémentaires. Ils permettent d'évaluer la nécessité de réalisation des travaux sur tout ou partie de l'ouvrage, dans les cas spécifiques de réhabilitation de la dalle de chaussée et du revêtement de la voûte. Les décisions de réhabilitation sont prises dans un cadre élargi de bon état fin de concession et le GEIE-TMB actuel gestionnaire-exploitant de l'ouvrage associe l'Italie et la France au travers de la Commission Inter-Gouvernementale. Les réflexions sur la programmation des travaux de réhabilitation du revêtement engagent le gestionnaire exploitant à des contraintes de fermeture d'ouvrage à l'exploitation sur de nombreux mois, qu'il faut répartir selon le contexte socio-économique local et binational.

À l'heure du numérique, avoir une gestion efficace et adaptée à la multiplication des données à conserver et à la dématérialisation devient primordial. De nombreux outils innovants comme le

BIM et les jumeaux numériques sont développés pour faciliter l'accès aux données, leur collecte ou leur suivi en temps réel et leur partage entre acteurs.

Par ailleurs, la prise en compte du contexte de développement durable et de transition écologique nous impose de maintenir et d'optimiser l'exploitation des infrastructures existantes, et d'intégrer, lorsque c'est possible des process vertueux dans les projets de travaux de réhabilitation.

## REFERENCES

Doreau-Malioche J., La surveillance au service d'une gestion efficace du patrimoine des tunnels routiers. *Transport environnement circulation (TEC)*, 257 - Mai 2023 - Surveillance et maintenance, au service des mobilités

L'ingénierie de gestion patrimoniale appliquée aux infrastructures routières – Guide de l'Institut Des Routes et des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité – juin 2021

Hidalgo A. P., Gestion patrimoniale des infrastructures de la RATP : développement d'un processus d'aide à la décision pour optimiser la stratégie de maintenance. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2015. Français. NNT : 2015PESC1200. tel-01376081

Univ Bordeaux. (2018, 27 mars). Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des tunnels de la RATP , in *Fiabilité des matériaux et des structures*. [Vidéo]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/97787>.

Livre blanc - Entretien et préserver le patrimoine d'infrastructures de transport : une exigence pour la France – Institut Des Routes et des Rues des Infrastructures pour la Mobilité – Octobre 2014

Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 40 : Tunnels, Génie civil et équipements – octobre 2012

Méthodologie d'aide à la gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages souterrains - Recommandation AFTES n°GT14R8F1, Tunnels et Espace souterrain n°236 – Mars/avril 2013

Daumarie J-C., Maintenance des tunnels ferroviaires, *Revue Française de Géotechnique* n°131-132 – 2è et 3è trimestre 2010

Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEO) - fascicule 0 - « Dispositions générales applicables à tous les ouvrages » et ses annexes : fascicule 1 - « Dossier d'ouvrage », fascicule 2 - « Généralités sur la surveillance », fascicule 3 - « Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde » - 2010.

Orcesi A., Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales. Université Paris-Est, 2008

Aubert C., Réhabilitation et modernisation du tunnel du Mont-Blanc, Les points clefs des travaux de génie civil, 2002

Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus – Recommandation de l'AFTES n°GT14R4F2, Tunnels et Ouvrages souterrains n°131 – Septembre/octobre 1995

Panet M., Quelques problèmes de mécanique des roches posés par le tunnel du Mont-Blanc, décembre 1969

Gudefin H., Observation sur les venues d'eau au cours du percement du tunnel sous le Mont-Blanc, Extrait du Bulletin du BRGM n°4, 1967

Jouret A., La construction du tunnel, Revue générales de routes et des aérodromes, n°427, décembre 1967

Guichonet P., L'achèvement du tunnel du Mont-Blanc, Revue de géographie alpine, tome 51, n°1 1963. pp. 145-154, 1963

Documentation technique spécifique aux projets de réhabilitation de la dalle et de la voûte du tunnel du Mont-Blanc

Dossier de Sécurité du tunnel du Mont-Blanc – Pièce 1 Description de l'ouvrage - juin 2019

Réhabilitation de la voûte du tunnel du Mont-Blanc – Phase Dossier de Consultation des Entreprises – D4-Programme fonctionnel Détaillé (PFD) – Version 05/10/2020

Réhabilitation de la voute du tunnel du Mont-Blanc – Phase projet – Mémoire technique du projet – Référence WBS TMB-TF00-PRO 1011-Indices C0

Réhabilitation de la dalle sous chaussée du tunnel du Mont-Blanc – 5.4. Note technique – Version 06/10/2022

Rapport sur l'état des structures du tunnel du Mont-Blanc, Phase II - Rapport technique RockSoil,

mai 2017