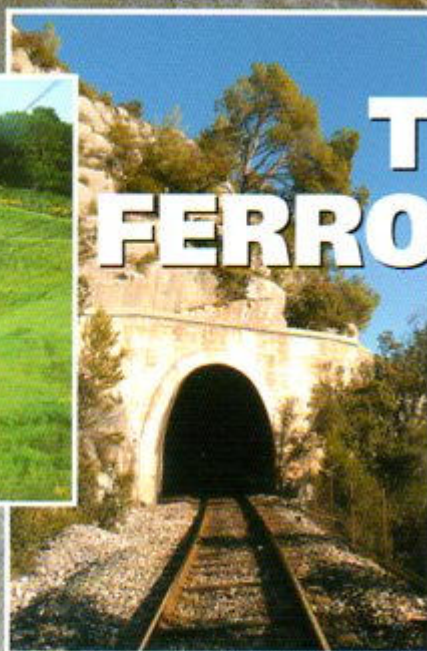


REVUE GÉNÉRALE DES CHEMINS DE FER

TUNNELS FERROVIAIRES



La maintenance des tunnels ferroviaires

Compréhension des processus de vieillissement par l'analyse des méthodes de construction

Gilles PARADIS et Patrick THIAUDIÈRE

Ce dossier, qui ne prétend pas détailler de manière exhaustive toutes les méthodes d'exécution, doit permettre au responsable de la maintenance, et à l'ingénieur chargé de la régénération, de comprendre les difficultés d'excavation d'un tunnel et lui donner des éléments d'appréciation pour en comprendre la pathologie et affiner le diagnostic.

■ Railway tunnel maintenance – Understanding ageing processes by analysis of construction methods

This article does not seek to consider exhaustively all construction methods, but aims at enabling maintenance managers and engineers responsible for regeneration, to understand the excavation difficulties for a tunnel and to provide them with the elements of appreciation needed to understand the pathology and refine the diagnosis.

■ Die Instandhaltung der Eisenbahntunnel – Verständnis der Alterungsvorgänge durch die Analyse der Konstruktionsverfahren

Dieser Artikel, der nicht danach strebt, erschöpfend alle Durchführungsverfahren zu schildern, muss es dem Verantwortlichen der Instandhaltung sowie dem mit der Regenerierung beauftragten Ingenieur ermöglichen, die Schwierigkeiten beim Aushub eines Tunnels zu verstehen, und ihm Bewertungselemente zu geben, um die Pathologie davon zu begreifen und die Diagnose zu verfeinern.

Les patrimoines « tunnels » des différents réseaux comportent tous des ouvrages de diverses époques, dont une très grande majorité sont anciens et construits au XIX^{ème} siècle. En ferroviaire, depuis une trentaine d'années l'activité travaux souterrains a repris avec le développement des lignes nouvelles. Les techniques de construction de ces ouvrages sont de ce fait extrêmement variées et il a semblé nécessaire d'en préciser les grandes familles, aussi bien celles utilisées par les anciens au cours du XIX^{ème} siècle, que celles plus récentes prenant en compte les concepts actuels d'interaction sol-structure.

Ce dossier, qui ne prétend pas détailler de manière exhaustive toutes les méthodes d'exécution, doit permettre au responsable de la maintenance, et à l'ingénieur chargé de la régénération, de comprendre les difficultés d'excavation d'un tunnel et lui donner des éléments d'appréciation pour en comprendre la pathologie et affiner le diagnostic.

Pour chaque tunnel, la construction est un cas d'espèce qui dépend essentiellement des conditions géologiques (nature, caractéristiques et particularités des terrains, présence d'eau) et des contraintes économiques au regard du

coût et de la durée des travaux. D'autres paramètres peuvent intervenir, tels que la géométrie de l'ouvrage (longueur, pente, section) ou l'environnement avec les spécificités entraînées par les ouvrages en zone urbaine, en site classé, ou en zone de montagne, mais là encore, le rôle de la géologie est prépondérant.

Les méthodes anciennes d'excavation

Les méthodes anciennes de construction des tunnels, comparées

aux méthodes modernes à soutènement immédiat, étaient génératrices d'une plus grande déconsolidation des terrains, d'irrégularités géométriques de construction, de vides d'extrados importants, de rabattements de nappe mal maîtrisés...

Ces points ne doivent pas être considérés comme une critique de « nos anciens », alors qu'ils ont su construire avec les technologies de leur époque des ouvrages exceptionnels dans des environnements difficiles, mais comme un simple constat objectif des difficultés que pose la maintenance de ces ouvrages. Seule l'expérience acquise par l'observation de leur évolution a permis d'imaginer, et de mettre en œuvre, des méthodes de construction plus élaborées qui permettront une maintenance plus aisée des ouvrages construits de nos jours.

Le constat le plus simple que l'on peut faire est que les imperfections des ouvrages se sont transformées, avec le temps en altérations affectant plus ou moins profondément leur qualité de service au point, dans certains cas, de remettre en cause la sé-

curité ou les possibilités d'exploitation.

Les techniques de percement utilisées autrefois vont de la méthode à pleine section avec soutènement à différentes techniques en section divisée.

■ La méthode à pleine section ou méthode anglaise

Cette méthode nécessite un fort boisage dont le tassement facilite la décompression du terrain lors du percement. Le surcreusement dû aux longrines va également favoriser une autre phase de décompression lors de leur retrait en cas d'absence de blocage.

Les efforts provoqués par la décompression du terrain sont reportés sur le revêtement frais qui constitue l'un des appuis des longrines de soutènement.

Comme la construction du revêtement débute par celle des piédroits, elle n'entraîne qu'un seul

niveau de clavage situé en clé de voûte qui peut être le siège des malfaçons habituelles (sous-épaisseur, absence de blocage, abandon de bois de blindage). Voir figures 1 et 2.

■ Les méthodes à sections divisées

Il s'agit de créer une première excavation de petite section qui va être progressivement agrandie.

Il existe plusieurs méthodes à sections divisées dont la différence essentielle réside dans la position de la ou des galeries initiales dans le profil d'excavation à réaliser.

La méthode belge

Dans cette technique, le percement est effectué à partir d'une galerie unique située au faite de l'excavation (figure 3). La voûte est maçonnée en premier puis les piédroits sont construits en sous-œuvre. Il y a donc trois niveaux de malfaçons potentiels, le clavage de la clé de voûte mais également les raccords entre voûte et piédroits.

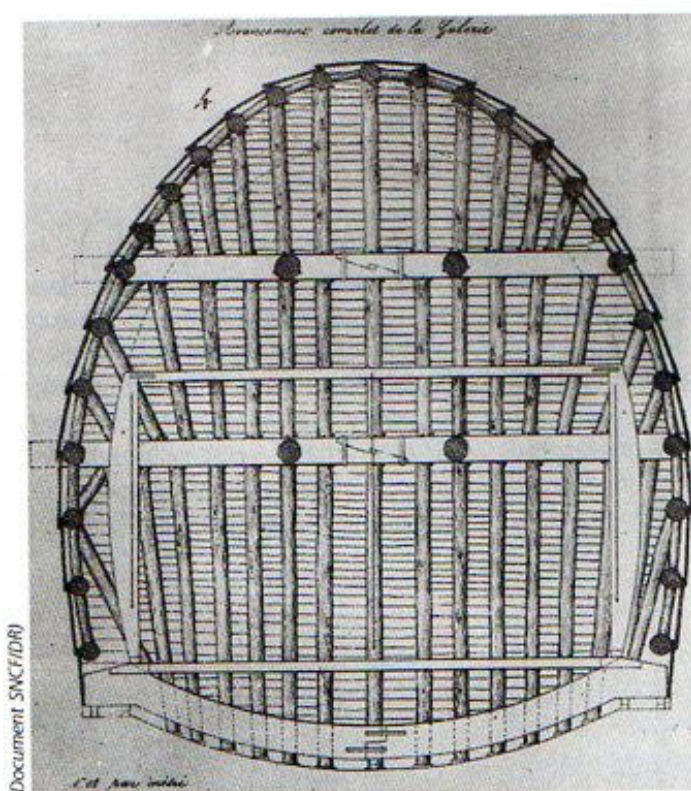


Fig. 1 - Blindage du front de taille, Tunnel de La Nerthe

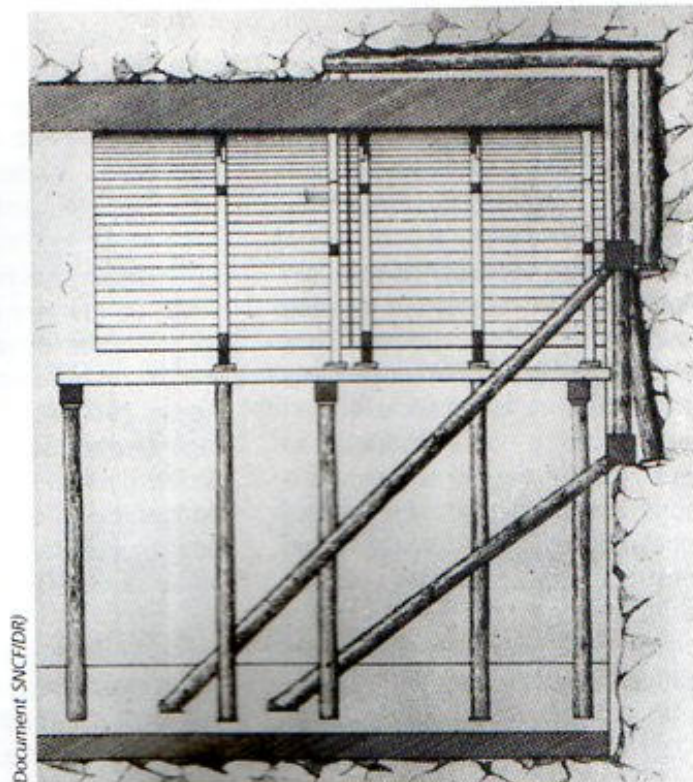


Fig. 2 - Coupe longitudinale, Tunnel de La Nerthe

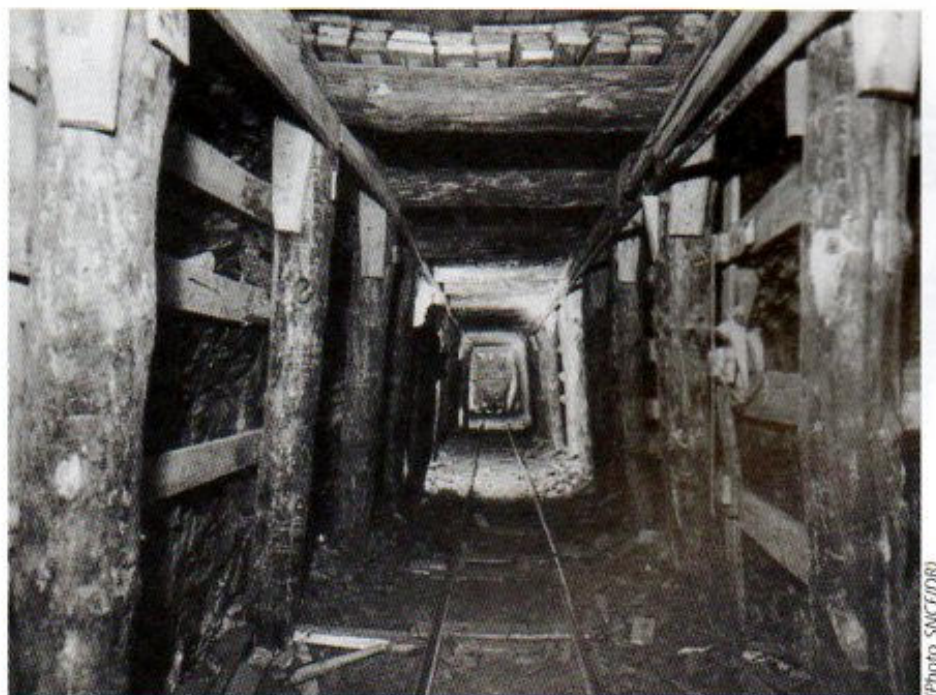


Fig. 3 - Galerie boisée avec fléchissement des porteurs, Tunnel de Monte Carlo

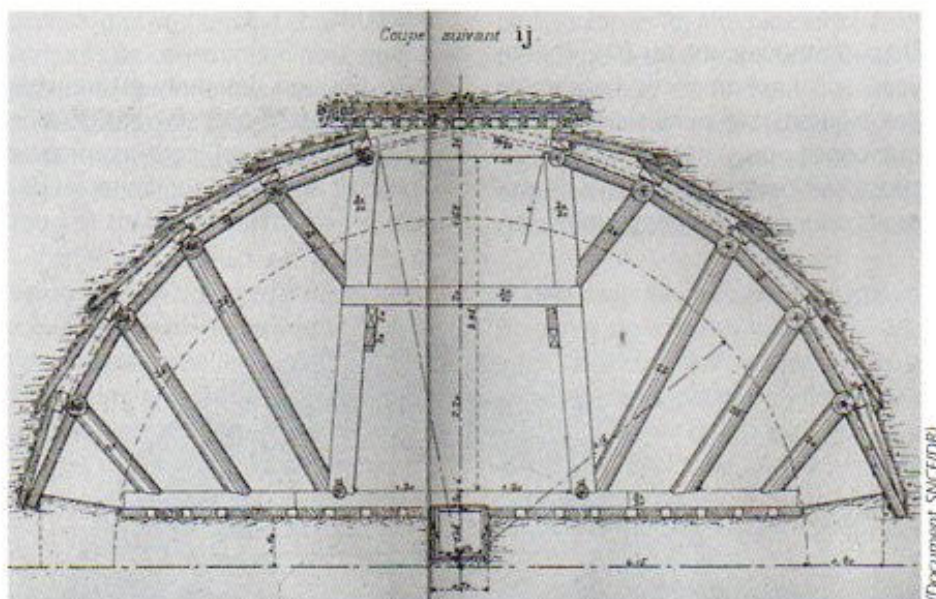


Fig. 4 - Soutènement de la voûte, Tunnel de Martinsart

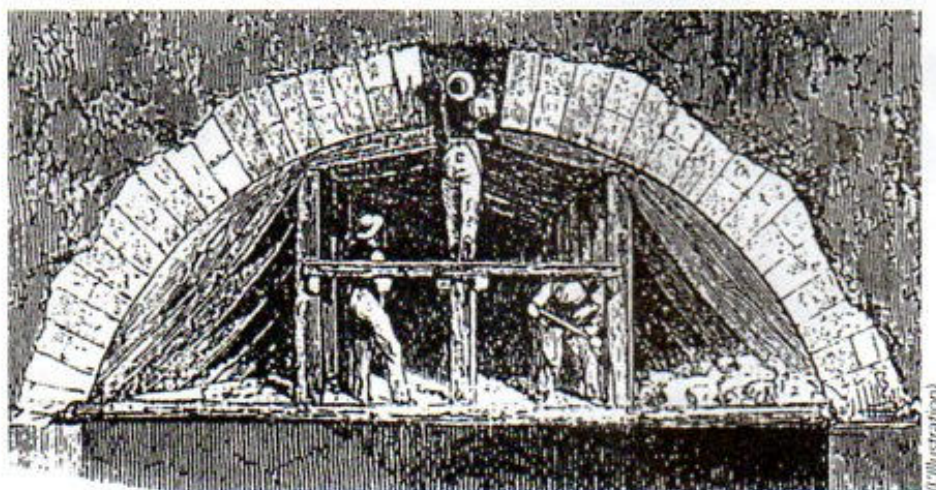


Fig. 5 - Clavage de la voûte, Tunnel de Blaisy-Bas

Établissement de la voûte

Une des particularités de cette technique est de générer un surcreusement au faite de l'excavation, ce qui peut provoquer un chargement non homogène en cas d'évolution tardive de l'encaissant.

Lorsque l'excavation de la section supérieure du tunnel est terminée, la construction de la maçonnerie de voûte peut commencer. Elle débute par la réalisation des éléments de la base appelés « murettes », sur lesquels vont venir s'appuyer les cintres destinés à recevoir le couchis et la maçonnerie (figure 4).

La maçonnerie de la voûte est effectuée ensuite par anneaux de 2,4 ou 6 m suivant la tenue de l'encaissant. Cette maçonnerie est montée des deux côtés de la voûte à la fois afin que les poussées s'équilibrent sur le cintre et que les tassements soient identiques des deux côtés.

Le travail s'effectue pour cette phase perpendiculairement à l'axe du tunnel.

L'opération de clavage de la voûte est la plus délicate. La maçonnerie de clavage est menée suivant l'axe du tunnel en travaillant à reculons, en partant de l'anneau antérieur déjà terminé. Les moellons de clavage sont serrés à la masse. La difficulté du travail à ce niveau a entraîné de nombreuses malfaçons de sous-épaisseur, l'absence de blocage, l'abandon de bois (figure 5).

Établissement des piédroits par reprise en sous-œuvre

Une fois la maçonnerie de voûte achevée, il faut approfondir l'excavation et construire les piédroits par reprise en sous-œuvre. Il y a plusieurs possibilités d'établissement des piédroits; les plus courantes sont par l'enlèvement du stross ou par la construction de puits.

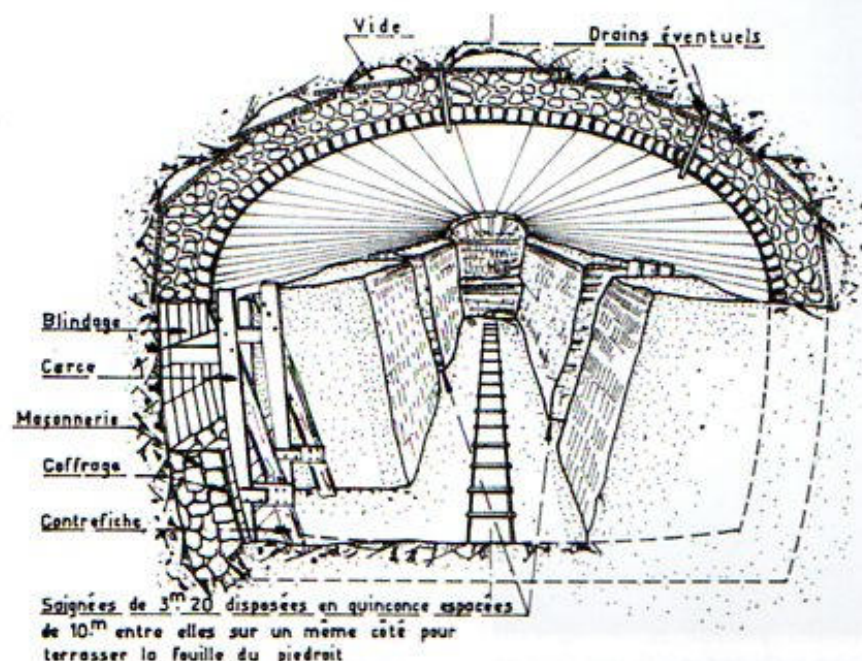


Fig. 6 - Méthode par enlèvement du stross ou de la tranchée

- Par enlèvement du stross ou revanché (ou méthode par tranchée d'après Széchy):

Cette méthode est signalée courante pour les terrains de tenue bonne à moyenne.

Lorsqu'une certaine longueur de voûte est terminée, longueur qui dépend de l'organisation du chantier, on creuse une tranchée longitudinale qui va du niveau des naissances au niveau supérieur du radier ou au niveau de la plate-forme. La largeur de cette tranchée varie avec la nature du terrain. Dans le cas de terrain très consistant, on ne laisse que de petites banquettes latérales, ces dernières sont plus importantes dans le cas d'un terrain de moins bonne tenue. Cette tranchée permet l'établissement d'une voie étroite utilisable pour le maritage et l'approvisionnement des chantiers élémentaires. À partir de celle-ci, on peut percer des niches en quinconce. La largeur des niches ou saignées varie également en fonction de la tenue du terrain.

- Par puits:

Cette méthode paraît plus adaptée aux terrains difficiles. Elle a été parfois abandonnée en raison des accumulations d'eau dans les puits qui ont nécessité des épuisements importants et qui ont délavé les joints de mortier frais.

Deux méthodes ont pu être employées, soit l'exécution de l'ensemble des piédroits par puits successifs en quinconce puis terrassement du stross, soit l'exécution de plots de piédroits pour constituer des appuis, ter-

rassement du stross puis excavation des derniers plots de piédroits.

Pour accélérer le percement

Le percement part d'une tête ou des deux têtes du tunnel. Pour accélérer le percement, il faut multiplier les attaques d'où la nécessité de construire des puits, des galeries ou des descenderies. La position des puits a, dans un premier temps, été disposée à intervalle régulier, comme au tunnel de Blaisy Bas avec 22 puits séparés de 200 m entre eux (avec des hauteurs variant de 14 à 197 m). Par la suite, outre les considérations topographiques, la position des puits était déterminée à partir de formules basées sur des cadences estimées de percement du tunnel et de fonçage des puits.

La position des puits est variable mais elle est le plus souvent décalée de l'axe du tunnel, cette configuration était adoptée pour limiter les dégâts en cas d'incident dans le puits

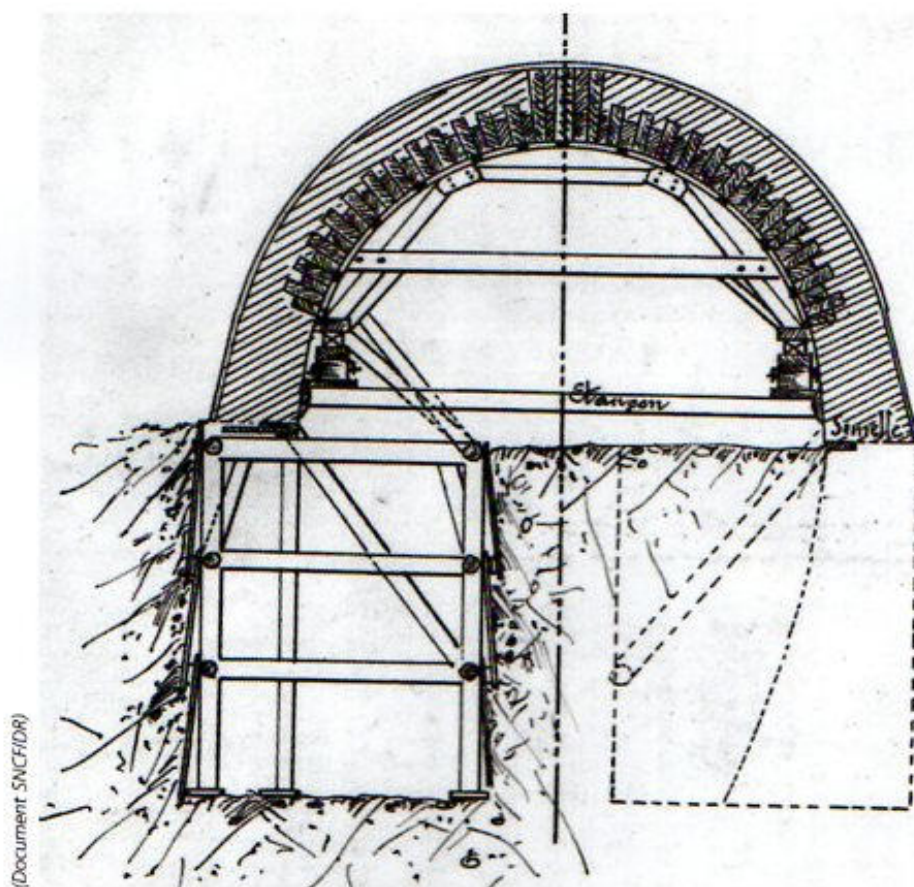


Fig. 7 - Méthode par puits, Tunnel de Malphètes

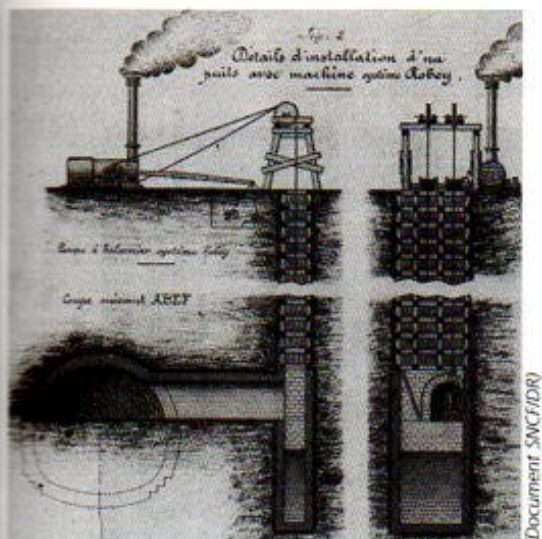


Fig. 8 - Puits de construction, Tunnel des Cabanes

(chute de matériaux, d'une benne...). Certains puits ont été conservés comme cheminée d'aération, dans ce cas les puits étaient plutôt implantés dans l'axe du tunnel. On a pu également profiter d'ouvrages déjà construits ou en cours de construction pour établir des puits communs ou des relations entre ouvrages. Les cas les plus célèbres sont les tunnels du Lioran et ceux d'Arzwiller.

La forme des puits est également variée mais on doit préciser que la forme elliptique n'était nullement destinée à descendre les chevaux par le puits, comme on l'entend parfois dire, mais à assurer un croisement des bennes comme dans la figure 8.

Le problème majeur des puits est de mettre en relation les niveaux aquifères supérieurs avec les terrains éventuellement sensibles situés au niveau du proche encaissant du tunnel. De grandes difficultés ont d'ailleurs été rencontrées dans certains fonçages de puits à la traversée de nappes aquifères qui ont entraîné des sujétions spéciales dans certains chantiers (cuvelage bois ou métallique, étanchement, pompage voire travail sous air comprimé sont mentionnés en archives). Celles du tunnel de Saint Irénée sont suffisamment explicites pour en citer des extraits : « On ne remontait pas une demi benne de déblais pour dix bennes d'eau de dix hectolitres chacune... un mois sans descendre d'un mètre au premier essai. »

La méthode autrichienne

L'attaque initiale est conduite à partir d'une galerie située à la base de la section à excaver (figure 9).

Cette méthode d'excavation est réputée plus efficace après l'invention des moyens d'abattage mécaniques. Aussi les exemples d'application dans les tunnels ferroviaires sont-ils globalement plus récents.

Elle présente l'avantage de conserver longtemps une galerie équipée pour l'évacuation des déblais et l'approvisionnement des chantiers élémentaires. Elle est en revanche gourmande en boisage et nécessite plus d'ouvriers. Il est par ailleurs possible d'établir le drainage à partir de la galerie de base et on peut multiplier les attaques sans passer par les puits de construction. Ce dernier avantage est primordial dans le cas de tunnel de grande longueur sous forte couverture où l'établissement économique de puits intermédiaires n'est pas possible.

Une variante courante consistait à maçonner la voûte avant les piédroits alors construits par reprise en sous-œuvre comme pour la méthode belge. Les constructeurs disaient « elle tient de la méthode autrichienne et de la méthode belge, dont elle cumule les avantages dans un terrain de bonne tenue. »

Pour le suivi des ouvrages percés de cette façon, il est important de

connaître l'ordre de construction du revêtement d'où va découler le nombre de zones de malfaçons potentielles (une en clé dans la méthode classique et deux supplémentaires en naissance pour la variante avec reprise en sous-œuvre).

■ Les défauts imputables à ces techniques

Anomalies géométriques

Dans les tunnels percés par méthode à section divisée, il y a parfois une anomalie géométrique à partir de la base des reins jusqu'en naissance, au niveau des raccords entre les murettes initiales de voûte et la naissance. La surveillance doit permettre d'identifier l'éventuelle évolution de cette géométrie perturbée et surtout l'apparition de défauts associés tels que déjoints, fissures, ou écaillage.

Pour les tunnels percés avec la technique à pleine section (méthode anglaise) ces anomalies géométriques sont plutôt situées en reins. La méconnaissance des caractéristiques du terrain a pu entraîner certaines erreurs ; ainsi dans le tunnel de la Nerthe, les constructeurs ont adopté un profil elliptique car ils craignaient les contraintes verticales issues de la relaxation du massif. Ils ont eu au contraire à supporter des efforts horizontaux importants. Lors des phases d'excavation, ces efforts se sont re-

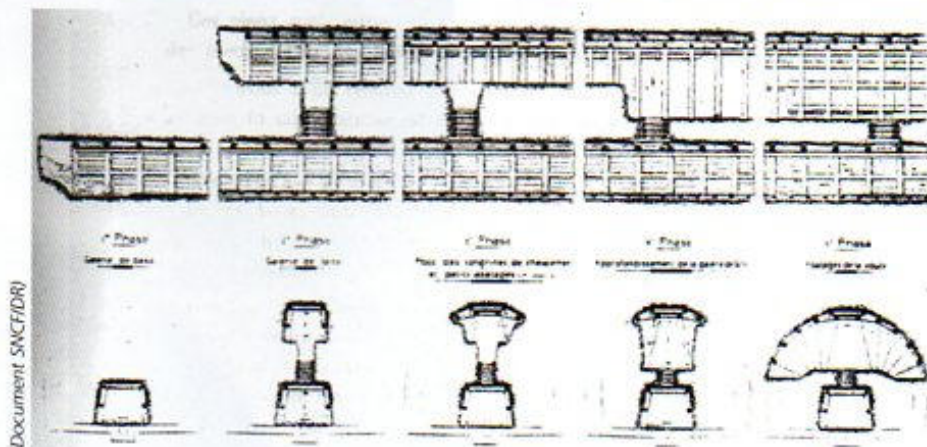


Fig. 9 - Coupe longitudinale, Tunnel de l'Ave Maria

portés sur les soutènements, et donc sur le revêtement frais qui participe à ce soutènement, en provoquant des anomalies de grande dimension. Les mesures postérieures ont montré l'existence de contraintes latérales très importantes dans ce massif avec un K_0 d'environ 4 (K_0 est le rapport entre les contraintes horizontales et verticales mesurées dans le terrain, il est voisin de 0,5 sous un recouvrement moyen).

Dans d'autres ouvrages, on peut constater des anomalies répétitives en voûte, celles-ci peuvent avoir plusieurs origines, de toute façon liées au mode de construction, soit un sous-dimensionnement des cintres supportant le coffrage soit un décentrement hâtif alors que la maçonnerie n'avait pas totalement fini sa prise.



Fig. 10 - Ondulations répétitives de la maçonnerie, Tunnel du Peilhou

Défauts de clavage

La réalisation du clavage de la voûte est un moment particulier de la construction des tunnels; de nombreuses malfaçons y sont constatées, notamment des sous-épaisseurs, l'abandon de bois ou des vides résiduels dus au surcreusement inhérent aux techniques de boisage. Avec le temps, les efforts peuvent devenir supérieurs à la résistance des éléments constitutifs de la structure (moellons, briques ou béton), il s'ensuit généra-

lement des écaillages bien localisés dans l'axe du tunnel.

Ce type de défaut existe également au niveau du raccord entre la voûte et les piédroits dans le cas d'une construction par méthode belge, avec les mêmes conséquences si des efforts sont appliqués par le terrain ou bien uniquement par le seul poids de la voûte.

Un autre défaut classique est la présence de planches horizontales disposées au sol avant construction des murettes. Non retirées lors de la phase de reprise en sous-œuvre des piédroits, elles peuvent, en pourrissant, entraîner un tassement différentiel de la voûte.

Défauts d'appareillage

Il s'agit des défauts relatifs à la disposition des moellons dans la maçonnerie. Pour les moellons schisteux, on retiendra la pose en délit, dans le sens de moindre résistance de la pierre, qui se délite en feuillets, même sous faible contrainte. D'autres anomalies relatives à la taille des moellons, comme l'incorporation de moellons concaves ou convexes ou de proportions importantes entre ces moellons, peuvent conduire à des pathologies spécifiques



Fig. 11 - Défaut de clavage, Tunnel de Chalezeule

généralement ponctuelles. Dans certaines maçonneries assisées à joints minces, il y a écaillage des bords des moellons mis en contact par le réajustement progressif des éléments du mortier mince altéré.

Des pathologies semblables peuvent être constatées dans les ouvrages récents dont le revêtement est constitué de voussoirs préfabriqués en béton. L'ovalisation de la section provoque la mise en contact des angles des voussoirs qui peuvent s'écailler.



Fig. 12 - Tassement d'un rouleau de briques, Tunnel de La Motte

L'absence totale de liaison entre les rouleaux de briques favorise la séparation des rouleaux avec le vieillissement du mortier ; apparaissent alors des sons creux et une légère déformation. L'évolution ultime est la chute d'un panneau de briques. Ce défaut est particulièrement sensible dans les tunnels en briques de l'ouest du réseau, tunnels construits par des entreprises anglaises en adoptant une disposition particulière des briques (en panneresses sans liaison entre rouleaux).

Hors profils

La maîtrise du profil d'excavation n'était pas assurée lors du percement à l'explosif. Il existait souvent des hors profils qui ont pu être très importants et ont pu nécessiter un traitement particulier. Celui-ci était très variable en fonction de la nature et de l'évolution de l'excavation.

Dans les terrains jugés assez stables, des résidus d'excavation, appelés blocage, sont installés à l'arrière du revêtement d'abord pour assurer une répartition des charges mais égale-

ment dans le but de drainer les arrivées d'eau du terrain.

Dans certains cas le vide a été laissé nu sans précaution. Une fois le revêtement construit et sans indication sur les documents de construction, au demeurant peu nombreux, ce vide ne peut être détecté que par des reconnaissances systématiques ou à but diagnostique.

Au tunnel de Vierzy, l'abaissement du profil du tunnel, après construction de la galerie de faite pour éviter le terrassement d'un banc de calcaire résistant, a nécessité le comblement du hors profil ainsi créé par la première position de la galerie de faite. Le profil d'excavation n'est pas régulier et le tassement des bancs du calcaire a provoqué des contraintes non réparties sur la voûte.

Enfin, il faut mentionner les cas spéciaux de certains ouvrages pour lesquels les aménagements peuvent être source de pathologies spécifiques. De grands hors profils en terrain instable, ont été comblés par fagots et éléments de madriers et pierres sèches. Le pour-

risement des bois abandonnés peut entraîner une nouvelle décompression progressive de l'encaissant.



Fig. 14 - Renforcement par piliers, Tunnel de Corbinères

Dans d'autres ouvrages, le terrain est soutenu par des murs transversaux ou par des piliers de briques construits entre le terrain et l'arrière du revêtement. Dans cette configuration, des efforts ponctuels peuvent être transmis au revêtement en cas de tassement de l'encaissant.

Les méthodes actuelles de construction

Les méthodes de construction actuelles peuvent se scinder en deux grandes familles, d'une part les méthodes mécanisées et d'autre part les méthodes dites conventionnelles :

- les méthodes mécanisées comprennent les techniques d'excavation où l'abattage est réalisé mécaniquement à l'aide de dents, pics ou molettes. Elles vont des simples machines de creusement, à attaque ponctuelle, ou à attaque globale, machine pleine face (tunnelier au sens strict), aux véritables machines de construction intégrant toutes les fonctions nécessaires à l'exécution complète du génie civil d'un tunnel, ce sont les boucliers. Ces derniers assurent soit un soutènement latéral (bouclier à front ouvert) soit simultanément un soutènement latéral et un soutènement frontal (bouclier à front pressurisé). Ces méthodes généralement conçues pour un type de terrain, sont très sensibles aux variations géologiques ;

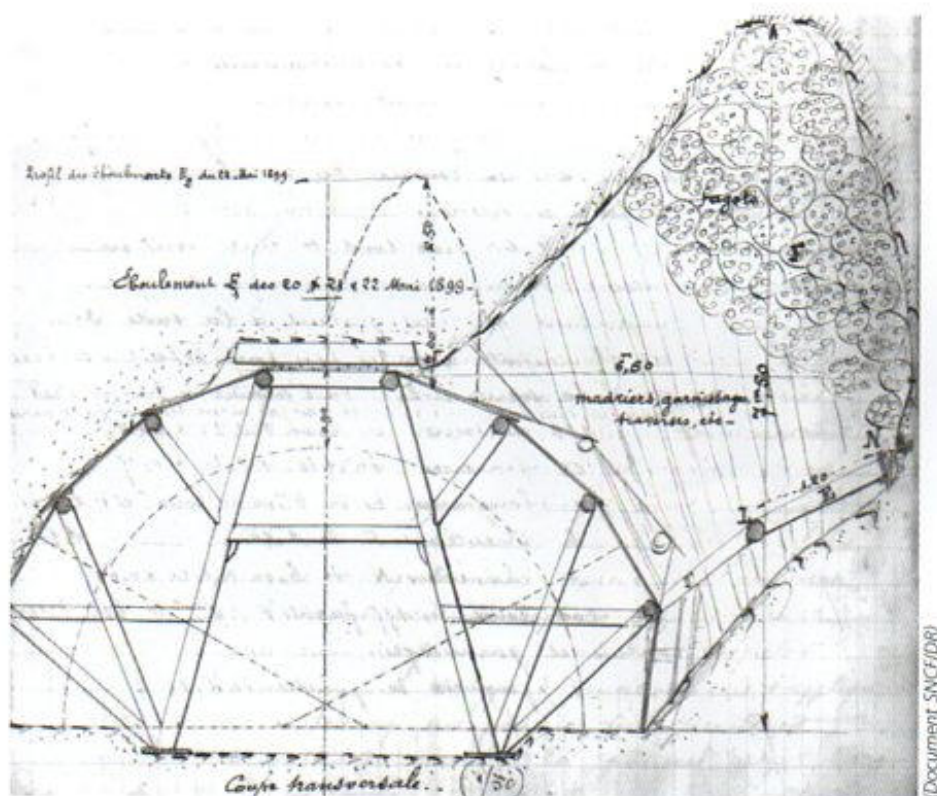


Fig. 13 - Comblement d'un hors profil par fagots et madriers, Tunnel de Malphètes



(Photo SNCF/DR)

Fig. 15 - Machine à attaque ponctuelle PAURAT, Tunnel de Vouvray

• les méthodes conventionnelles, appelées aussi séquentielles, sont peu mécanisées et se caractérisent par la répétition d'une séquence d'opérations élémentaires de construction traitées séparément par des moyens dédiés et selon un phasage adapté aux conditions rencontrées. L'avantage de ces méthodes tient à leur bonne adaptabilité, qui permet de prendre en compte la réalité du terrain à l'avancement, et de limiter ainsi les arrêts de chantier en cas d'imprévu géologique. Ces méthodes sont très diverses, et peuvent se distinguer selon le phasage (creusement en pleine section ou en section divisée), selon le mode de soutènement (soutènements lourd ou léger), ou enfin selon le mode d'abattage (à l'explosif, au brise roche, à la pelle mécanique ou par machine à attaque ponctuelle). Cette dernière machine, bien qu'étant classée dans les méthodes mécanisées lorsqu'elle effectue l'abattage et le marouflage de plein front, peut être la composante « excavation » d'une méthode séquentielle en section divisée comme ce fut le cas pour le creusement du tunnel de Vouvray.

La principale difficulté rencontrée à la construction d'un tunnel est d'assurer la sécurité et la stabilité de l'excavation, c'est le rôle du soutènement. De plus, il y a interaction forte entre la

méthode d'excavation et le mode de soutènement.

Ainsi un terrassement à l'explosif trop agressif, qui traumatise le massif encaissant, entraîne une surconsommation de soutènement. Dans ce domaine, l'utilisation de l'amorçage séquentiel, technique développée dans les années 80, a permis de limiter les nuisances des tirs, tout en augmentant le volume des volées grâce à un meilleur échelonnement des charges, améliorant ainsi les rendements. L'abattage à l'explosif pour

les ouvrages de la déviation ferroviaire de Monaco a ainsi pu être réalisé dans un environnement urbanisé sensible.

De même, le choix d'une forte mécanisation (bouclier) pour la construction d'un ouvrage peut amener à utiliser un soutènement par anneaux de voussoirs dans certaines formations, pour des raisons de facilité de mise en œuvre et de progression de la machine, indépendamment de la demande réelle du terrain.

En matière de soutènement, il existe actuellement deux approches différentes, d'une part les méthodes traditionnelles considérant le soutènement comme « passif », on parle alors de soutènement lourd, et d'autre part, les nouvelles méthodes où le soutènement joue un rôle « actif » (soutènement léger) comme dans la nouvelle méthode autrichienne NATM, ou la méthode italienne connue sous le nom d'ADECO-RS.

■ Les méthodes séquentielles à soutènement « passif »

Ces méthodes dérivées du boisage des techniques anciennes de construc-



(Photo SNCF/DR)

Fig. 16 - Soutènement lourd, Tunnel de Marseille

tion, agissent par supportage, en privilégiant la résistance du soutènement qui s'oppose à la déformation du terrain en parement de l'excavation.

Elles sont généralement consommatrices de matériaux et de temps, nécessitant un chantier cadencé avec des cycles bien organisés, mais restent « sécurisantes » pour le mineur.

Ces méthodes sont actuellement utilisées dans les terrains altérés ou tectonisés (failles, karsts...), dans les zones de tête ou sous faible couverture. Elles font généralement appel à des cintres lourds type HEB associés à des voûtains en béton projeté entre cintres nécessitant une attention particulière au blocage des cintres au terrain. La présence de cintres lourds permet également la mise en œuvre de tôles de blindage en intrados avec béton de blocage entre tôles et terrain, ou encore l'enfilage de tôles ou de barres d'acier en extrados des cintres. Le cycle d'avancement est fonction de l'espacement des cintres, qui varie habituellement de 0,80 m à 1,60 m, selon la qualité du terrain.

En cas d'instabilité en toit ou en front de taille, on fait appel à des techniques de présoutènement telles que les « casquettes » obtenues par fonçage de barres HA à la périphérie de l'excavation, ou les « voûtes parapluie » constituées de tubes métalliques disposés en calotte à faible distance du profil d'excavation. Cette dernière technique est régulièrement utilisée en zones de tête.

Une solution employée sur plusieurs ouvrages de LGV consiste à associer un prédécoupage mécanique à des prévoûtes en béton. Dans ce cas, il s'agit de réaliser un soutènement préalable à l'excavation par remplissage de béton projeté d'une saignée en extrados de voûte, effectuée par prédécoupage mécanique à l'aide d'une machine spécifique. À l'abri de ce soutènement, l'excavation se fait en grande masse et selon la nature des terrains, des cintres de sécurité

sous les prévoûtes peuvent compléter le dispositif.

Cette méthode a été utilisée aussi bien en demi-section supérieure (c'est le cas des tunnels de Fontenay-aux-Roses et de Sceaux) qu'en pleine section (tunnel de La Galaure). Elle présente l'avantage d'un chantier industrialisé et cadencé avec pour contrepartie de figer l'avancement du chantier, en fonction de la longueur des prévoûtes réalisées.

Dans cette méthode, le problème majeur reste le risque de rupture de prévoûte si le bétonnage de la saignée n'a pu être parfaitement réalisé du fait d'un éboulement de sa paroi, incident rencontré à la construction du tunnel de Limeil-Brevannes dans des terrains remaniés en présence de blocs de meulrières et de circulation d'eau.

■ Les méthodes séquentielles à soutènement « actif »

La nouvelle méthode autrichienne NATM

Cette méthode de soutènement actif, NATM (new austrian tunneling method), née au début des années

soixante en Suisse et en Autriche, préserve dans la mesure du possible les caractéristiques mécaniques initiales du terrain, en agissant par confinement, et en créant autour de l'excavation un anneau porteur de terrain armé.

Pour cela l'excavation doit avoir une forme régulière et arrondie (les points anguleux entraînant des concentrations de contraintes). Après abattage, le terrain est renforcé par boulonnage afin de constituer une armature radiale tendant à limiter l'extension de la zone décomprimée et l'amplitude des déformations. Une coque de béton projeté fibré ou armé d'un treillis soudé (éventuellement de cintres légers, TH ou réticulés) est ensuite réalisée pour développer en parement de l'excavation, après une certaine convergence, une contrainte radiale de confinement. Dans les terrains déformables, il est nécessaire de renforcer le soutènement et de fermer rapidement la section par un préradier. Enfin, une auscultation permanente permet de contrôler le comportement du terrain en termes d'amplitude, de vitesse et d'accélération des convergences. Le soutènement ainsi mis en œuvre sert à éviter l'extension de la zone plastique en accompagnant la déformation du massif. On parle alors de soutènement léger par opposition aux



Fig. 17 - Soutènement léger NATM, Tunnel de Marseille

méthodes précédentes, bien que pour les tunnels en terrains tendres et déformables le soutènement soit relativement rigide.

Cette méthode, qui impose une rapidité de mise en place de la première phase du soutènement (ancrages et première couche de béton projeté), permet cependant une certaine souplesse dans le cycle de mise en œuvre, puisqu'une partie du soutènement (seconde phase) peut être réalisée en temps masqué, et renforcée à la demande en fonction des déformations enregistrées. En contrepartie elle nécessite une organisation rigoureuse et une auscultation en temps réel, afin de mieux connaître les besoins du massif. Elle a été utilisée avec succès dès les années 70 pour le creusement du tunnel de Grigny dans des marnes de qualité géotechnique médiocre.

La méthode italienne ADECO-RS

Cette méthode récente, ADECO-RS (analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli) connue également sous le nom de méthode Lunardi, a été mise au point en Italie dans des terrains tendres et déformables ou tectonisés. Elle systématise le présoutènement, en cherchant à améliorer le terrain en avant du front, afin de mobiliser au mieux sa résistance propre.

Elle peut être considérée comme une généralisation en 3D de la nouvelle méthode autrichienne.

Le présoutènement mis en place au front, est constitué d'ancrages fibre de verre de grande longueur (20 m env.), avec une densité élevée, mis en œuvre tous les 10 à 12 m d'avancement. Ces ancres longs peuvent être associés à des prévoûtes de jet grouting. L'excavation se fait ensuite en pleine section quelle que soit la qualité du terrain, par travée courte. Le soutènement est relativement rigide (cintres HEB et béton projeté) pour limiter les déformations en terrain tendre. Le revêtement final est

mis en place le plus près possible du front, et l'anneau bétonné est toujours fermé par une contre-voûte en radier.

Cette méthode, facilement modulable au fur et à mesure de l'avancement, a nécessité la mise au point de machines spécifiques adaptées aux différents types de soutènement mis en œuvre, permettant ainsi une véritable industrialisation de la construction.

Comme la méthode précédente, l'auscultation est indispensable pour apprécier la réponse du terrain pendant l'excavation, notamment l'extrusion au niveau du front, la convergence en parement, à proximité et à distance du front.

Cette méthode de soutènement lourd pleine section a été retenue au tunnel de Tartaiguille malgré l'importance de la section excavée (180 m²).

On constate qu'actuellement, sur un même ouvrage on passe progressivement de l'approche traditionnelle (soutènement passif) aux nouvelles méthodes (soutènement actif) en fonction de la gradation des soutènements nécessaire au regard de l'évolution des caractéristiques géomécaniques des terrains. Ainsi les zones de tête ou les passages délicats (failles...) sont traités par supportage,

alors que le soutènement en plein massif fait souvent appel aux nouvelles méthodes qui font participer le terrain à son propre soutènement. Les tunnels de Monaco et de Marseille en sont de bons exemples.

■ Les méthodes mécanisées aux tunneliers et boucliers

Bien que cette technique ait été mise œuvre dès la fin du XIX^e siècle, il faut attendre les années « soixante » pour voir le développement de ces machines à forer pleine section. Elles sont de types variés et leur classement est difficile. En fait, leur architecture diffère selon la nature du terrain (roche ou sol) et la nécessité d'assurer un soutènement latéral et frontal. De plus la présence d'eau dans le terrain (ouvrage sous charge hydrostatique) influe également sur leur conception.

On distingue communément deux grandes familles :

- les tunneliers au sens strict, dit TBM (tunnel boring machine), qui sont de simples machines de creusement n'ayant pour fonction que l'excavation (abattage) et l'évacuation des déblais (marinage);
- les boucliers à front ouvert ou fermé, « shield » en anglais, qui sont des machines intégrant toutes les



(Photo SNCF/DR)

Fig. 18 - Soutènement actif ADECO-RS, Tunnel de Tartaiguille

fonctions nécessaires à l'exécution complète d'un tunnel: abattage, marouflage, soutènement, revêtement et étanchéité.

Les tunneliers TBM

Ces machines d'abattage par attaque globale (pleine face) comportent une tête de foration constituée d'un plateau tournant équipé d'outils (molettes simple disque ou multi-disque) qui agissent par poinçonnement pour faire éclater la roche, en traçant des sillons sur le front de taille. Si la résistance à la compression de la roche est un élément déterminant, sa structure (litage) et son état de contrainte initial, interviennent également pour caractériser la forabilité. D'autres éléments non négligeables comme l'abrasivité et la dureté de la roche, conditionnent l'usure des molettes.

Le corps de la machine est constitué de deux parties distinctes. D'une part un dispositif d'appui ou d'ancrage, le bâti stationnaire, capable de reporter la poussée de la machine sur la paroi du tunnel par grippage radial, qui est fixe pendant toute la durée d'un cycle d'excavation. D'autre part un corps de creusement, comprenant la tête d'abattage mobile en rotation, qui est solidaire (par l'intermédiaire d'un roulement) d'une poutre centrale couissant à l'intérieur du bâti



Fig. 20 - Soutènement à l'arrière du TBM, Galerie de Monaco

stationnaire durant le cycle, permettant ainsi l'avancement.

Le cycle d'excavation est simple: après ancrage sur la paroi du tunnel (grippage), la tête de foration tourne et avance sous l'action des vérins de poussée, la foration commence. Les déblais récupérés, traversent la tête du tunnelier pour être évacués vers l'arrière par bande transporteuse. Les vérins de poussée ont une course donnée qui limite la longueur excavée

d'un cycle (environ 1 m). Il faut alors arrêter la foration et repositionner le tunnelier (opération de grippage) pour un nouveau cycle.

Ces machines sont spécifiques aux terrains de bonne cohésion (roches), sous faible charge hydraulique. Un soutènement peut être mis en place à l'arrière du tunnelier en temps masqué. Il se compose généralement de boulons et de béton projeté, voire de cintres si besoin.



Fig. 19 - Tunnelier TBM Robbins, Galerie de Monaco

Plusieurs machines de ce type ont été utilisées lors des travaux de la déviation ferroviaire de Monaco: pour réaliser la galerie de reconnaissance (tunneliers Robbins Ø 3,00 m et Atlas Copco - Jarva Ø 3,60 m), ainsi que pour creuser les avant-trous pour l'abattage à l'explosif (tunnelier Wirth Ø 5,00 m).

Les boucliers à front confiné

En terrain tendre, de faible cohésion (sol), la mise en œuvre d'un soutènement est indispensable, les boucliers ont donc été conçus pour assurer simultanément les deux fonctions de base: creusement et soutènement.

Le creusement peut être effectué soit par un bras excavateur mobile, à l'image des machines à attaque ponctuelle, soit par un plateau circulaire tournant, portant des outils d'abattage : pics, dents, couteaux et molettes, de formes variables, adaptés à la nature des terrains. La poussée sur la tête de foration est exercée par des vérins qui prennent appui longitudinalement, sur l'anneau de revêtement préalablement réalisé. Ce revêtement généralement préfabriqué, est constitué de voussoirs en béton armé, mis en place par un érecteur à l'intérieur de la jupe de protection de la machine, formant une succession d'anneaux. Cette méthode présente un caractère répétitif et industriel qui permet d'optimiser les coûts de construction et d'améliorer les conditions de sécurité et d'hygiène au front.

La conformation de ces machines permet deux modes de soutènement :

- le mode « ouvert », où le front est soumis à la pression atmosphérique ; ce sont les boucliers utilisables dans les terrains d'assez bonne cohésion, hors nappe ou sous faible charge d'eau, sans risque d'instabilité du front. Le bouclier n'assure que le soutènement en voûte et piédroits du tunnel, grâce à sa jupe ;
- le mode « fermé », où le confinement du front est assuré par la mise en pression de la chambre avant du tunnelier (chambre constituée par une cloison étanche placée juste à l'arrière de la tête d'abattage). Cette



Fig. 21 - Anneaux de voussoirs, Tunnel de Villejust

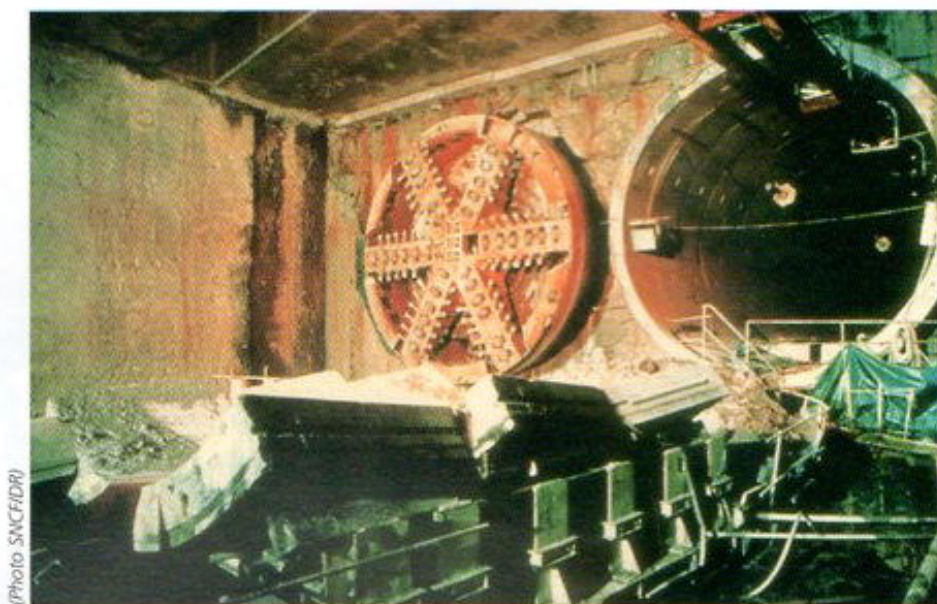


Fig. 22 - Bouclier, tunnels intergare Éole

pression dite de « confinement » destinée à équilibrer la charge hydrostatique et à stabiliser le front de taille, peut être réalisée à l'aide d'air comprimé, de boue bentonitique ou du matériau excavé lui-même (pression de terre).

Dans le cas des boucliers à confinement d'air comprimé, le maintien de la pression au front suppose une perméabilité réduite du terrain et un niveau de pression hydrostatique relativement faible.

De technologie relativement récente, les boucliers à confinement de boue (Slurry type), ont un mode de fonctionnement assez sophistiqué. La chambre d'abattage remplie de boue bentonitique est maintenue à une pression telle qu'elle équilibre à la fois la pression hydrostatique et la poussée des terres. De plus, la boue sert également à évacuer les déblais d'abattage (marinage hydraulique) et à assurer le refroidissement des outils. Sur ces machines, une centrale d'acquisition est nécessaire pour la régulation et le contrôle permanent de tous les paramètres (débit de boue, débit solide évacué, pressions, poussée, avancement...), puisque le débit d'alimentation de la chambre fluctue en fonction du débit de refoulement, qui est lui-même ajusté sur une vitesse de circulation évitant la décantation des

matériaux dans les tuyauteries et la vitesse d'avancement de la machine.

C'est une des premières machines de ce type en France qui a réalisé le tunnel de Villejust (bouclier Ø 9,25 m de type Bade & Theelen, système hydroschild Wayss & Freytag). Une machine de seconde génération (bouclier Ø 7,40 m Voest-Alpine) a été utilisée pour le creusement du tunnel intergare ÉOLE.

Les boucliers à confinement de terre (EPB type - Earth Pressure Balance), représentent la dernière génération de machines. Le procédé consiste à créer une pâte plastique et imperméable à partir du terrain abattu au front, remplissant totalement la chambre d'abattage.

L'extraction de ces matériaux pâteux, qui se fait par l'intermédiaire d'un sas constitué d'une vis sans fin (vis d'Archimède), est contrôlée et le débit est asservi pour maintenir une pression constante au front. La maîtrise du confinement se fait par la vis, dont la longueur est fonction de la charge hydraulique ; là encore, le contrôle du volume de matériau extrait est primordial.

Lorsque le terrain ne présente pas les caractéristiques optimales de plasticité et de fluidité requises, on utili-

se des adjuvants (agents dispersants pour les matériaux cohérents, agents lubrifiants pour les matériaux frotants) afin de mobiliser un gradient de pression dans la vis.

Après avoir atteint la pression nécessaire dans la chambre d'abattage, la progression du creusement se fait à volume constant; le volume évacué de la chambre est égal à celui abattu au front.

Ces machines doivent disposer d'un couple moteur important, puisqu'au couple nécessaire au brassage des déblais dans la chambre s'ajoute celui d'abattage au front.

Enfin, actuellement de nouveaux types de boucliers se développent, permettant une mixité de fonctionnement afin de s'adapter aux différents types de terrain rencontrés.

■ Méthodes en tranchée couverte ou cut and cover

Les ouvrages réalisés à ciel ouvert, ont des méthodes qui diffèrent selon la place disponible en surface, la nature du terrain et la présence de la nappe.

Le terrassement peut être exécuté soit sans blindage, en fouille talutée, il faut alors disposer d'emprises importantes, soit avec blindage des parois de la fouille. Ce blindage peut être constitué de parois berlinoises, de parois moulées, de parois préfabriquées ou encore de parois clouées. En présence d'eau, il est nécessaire de drainer ou de pratiquer un rabattement de nappe; le blindage de la fouille doit être étanche et le fond de fouille est alors traité pour résister aux sous-pressions. Pour les terrassements de grande profondeur, il est nécessaire de stabiliser les parois par un bouclonnage ou des tirants d'ancrages.

Les terrassements peuvent également être réalisés « en taupé » pour minimiser l'impact des travaux sur

l'environnement, notamment en site urbanisé.

Les constituants des tunnels

■ Constitution des revêtements

Nous avons vu l'hétérogénéité des modes de construction des tunnels, à celle-ci s'ajoutent l'hétérogénéité des terrains rencontrés et celle de la nature des revêtements réalisés. Bien que la grande majorité des tunnels soit revêtue en maçonnerie de moellons, on trouve également des maçonneries de briques, des revêtements de béton et même des tunnels ou parties de tunnels sans revêtement.

Pour les revêtements, on a employé toutes sortes de natures de pierres et leur mode d'assemblage est également varié. Celles-ci étaient, le plus possible tirées des matériaux d'extraction, car les entreprises cherchaient à éviter les transports et les mises en dépôts. La fonction d'un moellon de parement est de transmettre les efforts aux assises inférieures, ou supérieures et d'assurer la liaison entre le parement et le corps du revêtement. La fonction d'ancrage est assurée par la

longueur de queue et la transmission des efforts par le retour d'équerre.

Le liant de hourdage des maçonneries est un mélange de sable et de chaux dans une proportion variant de 250 à 400 kg de chaux hydraulique pour 1 m³ de sable. La chaux hydraulique est le résultat de la cuisson de calcaire argileux vers 850°C. On a employé des sables de rivière pour éviter la présence d'argile. Pour les joints de briques, de pierres de taille et les rejointoiements, on employait des sables fins. Ce mélange, le mortier, était fabriqué au moyen de manèges, roues broyeuses qui assuraient le mélange sable chaux et écrasaient les incuits. Il était réalisé à sec avant l'ajout d'eau. La fabrication manuelle n'était autorisée que pour des travaux isolés de petite dimension.

À l'origine, les briques étaient façonnées à proximité immédiate du tunnel sur des chantiers forains. Elles étaient fabriquées par cuisson d'argile éventuellement additionnée de sable et après trituration permettant d'obtenir une pâte homogène. Le moulage s'effectuait à la main dans des moules en bois ou en fer puis la brique sèche lentement sur des claies avant d'être cuite par moules de 25 000 à 100 000 briques à une température de 900 à 1 250°C. La taille des briques est variable selon les pays,

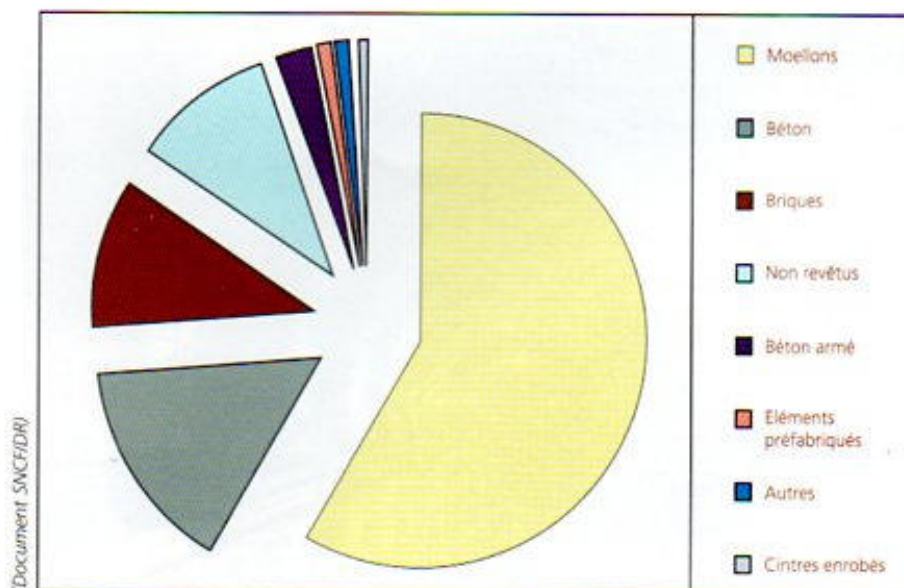


Fig. 23 - Répartition des natures de revêtement

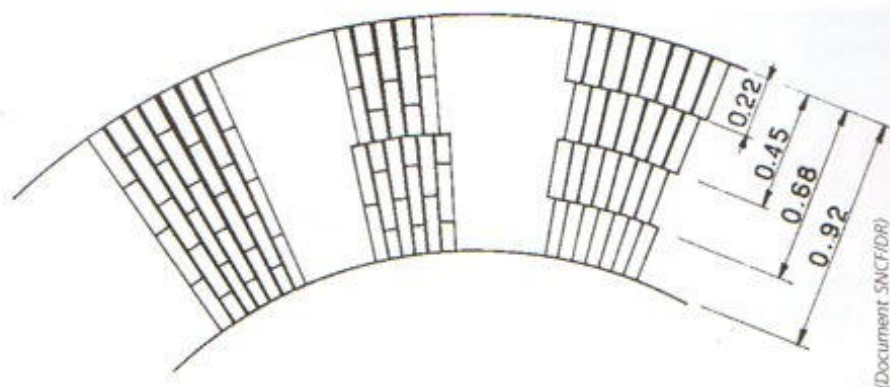


Fig. 24 - Appareillage des briques

les plus courantes sont les briques dites de bourgogne en France (de taille 5,5x11x22) et les briques de module anglais légèrement plus grosses (de taille 6x12x23) utilisées dans l'ouest du réseau.

Le béton est apparu tout à la fin du XIX^{ème} siècle dans les tunnels, il s'agit d'un mélange de granulats, de sable, d'un liant et d'eau selon un dosage donné. Les caractéristiques du béton diffèrent selon la nature du liant, les bétons de chaux sont assez rares et utilisés le plus souvent au niveau des fondations de piédroits ou dans les radiers des tunnels les plus anciens. Les bétons de ciment constituent une proportion des ouvrages non négligeable à partir du début du XX^{ème} siècle. Le dosage de ciment utilisé est fonction de la résistance désirée, en règle générale la proportion est de 300 à

350 kg de ciment par mètre cube de béton. On notera que les ouvrages réalisés ou reconstruits pendant les périodes de conflits du XX^{ème} siècle présentent parfois des sous-dosages dus à la pénurie de ciment.

Les revêtements des tunnels récents sur LGV par exemple, sont constitués soit de béton généralement non armé (à l'exception du radier) coulé en place dans des coffrages métalliques, soit de voussoirs en béton armé pour les ouvrages réalisés au bouclier. En méthode séquentielle, selon la technique retenue pour l'excavation, le revêtement peut être bétonné en une seule fois, voûte et piédroits ou en plusieurs phases lorsque les piédroits sont réalisés par reprise en sous-œuvre après bétonnage de la voûte. Dans ce cas, *comme pour les méthodes anciennes*, il faut veiller à avoir un bon clavage au contact

piédroits - voûte. Le radier est systématiquement réalisé en béton armé afin de garantir une bonne stabilité de la plate-forme. Les aciers d'armature sont remontés dans les banquettes. Lorsque les contraintes appliquées sur l'ouvrage sont importantes (charge hydrostatique par exemple) ou pour des raisons de stabilité au feu, un ferrailage de la section complète peut être réalisé. Enfin les bétons doivent être constitués de ciments résistant aux eaux agressives (ciments à haute teneur en laitier), et les ouvrages sous nappe sont généralement étanchés en interposant une feuille PVC entre le revêtement et le soutènement.

■ Les types de structure

Malgré l'hétérogénéité de construction et de constitution des tunnels ferroviaires, il existe des facteurs d'homogénéité. Ainsi plusieurs grands types d'ouvrages peuvent être définis en fonction de leur mode de fonctionnement mécanique.

Les ouvrages non revêtus

Les problèmes sont du même ordre que ceux rencontrés dans les tranchées rocheuses.

Même si la vitesse d'altération est inférieure à celle constatée sur les revêtements, divers incidents doivent alerter les acteurs de la surveillance sur les particularités de ce type de tunnels.

L'abord de ces parties d'ouvrage reste délicat car on n'a pas encore l'habitude de faire des études fines de fracturation et de stabilité des polyèdres. La surveillance attentive permet cependant de juger des évolutions et de différencier des zones de tunnel, ou des tunnels entre eux, pour proposer une programmation des travaux pertinente. La plate-forme ferroviaire est parfois équipée d'une nappe géotextile pour localiser de manière objective les tronçons avec chute d'éléments du rocher en vue de la définition des travaux de confinement.



Fig. 25 - Revêtement en béton, Tunnel de Marseille



Fig. 26 - Inspection d'un tronçon non revêtu, Tunnel de Chazelles

Les voûtes parapluie

Ce sont des structures non porteuses qui ont été construites pour éviter les égouttures sur la voie ou les chutes de petits blocs du terrain encaissant.

Leurs caractéristiques sont des épaisseurs de revêtement faibles (de 0,20 à 0,40 m), une qualité médiocre des matériaux constitutifs des maçonneries, la présence assez systématique de vides et hors profils en voûte, et la présence d'un terrain de bonne résistance de fracturation moyenne.

Les risques habituels sont liés au vieillissement des matériaux sous l'action du milieu et le risque majeur pour ces structures est la mise en charge progressive par la décompression du terrain.

Les structures porteuses

Elles concernent des tunnels situés dans les terrains de caractéristiques médiocres (faible cohésion, argiles gonflantes, anhydrite) avec épaisseurs de revêtement confortables, terrain au contact de celui-ci, bonne qualité des matériaux utilisés (moellons nobles, béton épais...). Ce type de structure a parfois été utilisé en rénovation à la suite des dégradations du revêtement d'origine et de façon systématique en reconstruction suite à destruction par fait de guerre.

Les problèmes peuvent être un dépassement des efforts admis-

sibles, l'absence de butée, les tassements différentiels; les travaux antérieurs destinés à augmenter le débouché par rescindement peuvent également affaiblir ces structures.

Les tunnels courants

Ce sont des structures courantes pas suffisamment dimensionnées pour supporter de très fortes charges mais qui tiennent compte d'une évolution potentielle du terrain.

Avec une épaisseur de 0,60 à 0,80 m, susceptible de fortes variations, on les retrouve en zones de têtes des tunnels à voûte parapluie, dans les franchissements sous faible couverture.

Ces ouvrages peuvent cumuler les problèmes des deux types précédents, inadéquation de la structure aux contraintes, qualité médiocre des matériaux utilisés avec des malfaçons courantes (irrégularités géométriques, problèmes de clavage).

Vieillessement

Il se traduit par deux types d'évolutions: celle des matériaux constitutifs du revêtement d'une part, celle de l'encaissant, au sens large, d'autre part. Suivant les types de tunnel définis ci-dessus, on rencontrera plus facilement l'un ou l'autre mais les deux types d'évolution peuvent être observés simultanément.

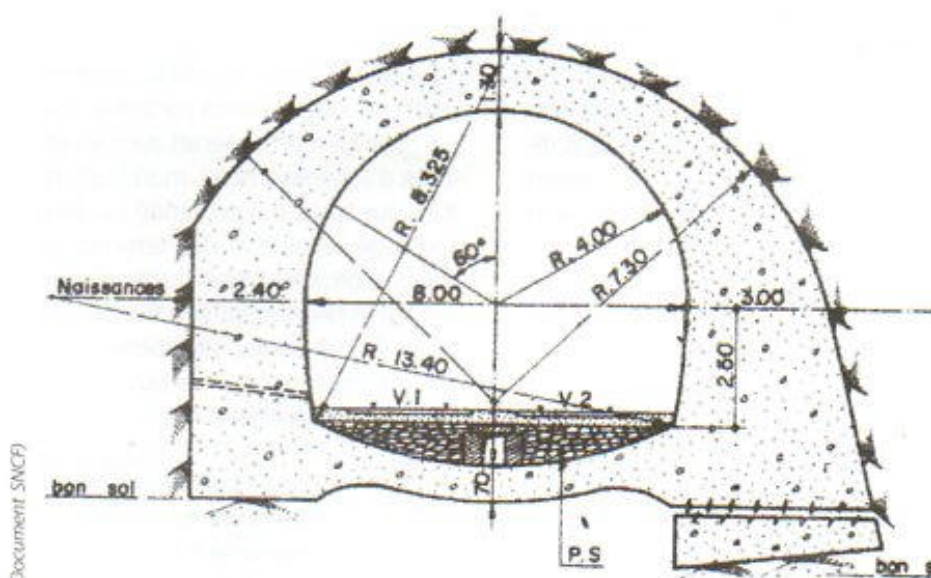


Fig. 28 - Voûte porteuse

■ L'évolution des matériaux constitutifs des ouvrages

Ce sont essentiellement des actions chimiques. Sans vouloir faire un inventaire exhaustif des altérations constatées, on peut les classer en diverses catégories.

Le vieillissement des liants des maçonneries: comme nous l'avons vu, les premiers ouvrages étaient hourdés en mortier de chaux, avant que n'apparaissent, puis se développent, les ciments que nous connaissons aujourd'hui. Les actions chimiques, la plupart du temps liées à des circulations d'eau, provoquent une disparition des éléments actifs des joints de maçonnerie, conduisant peu à peu à la diminution, voire à la disparition de la cohésion, transformant le mortier des joints en un matériau proche d'un sable, ce qui conduit à des déjointoiements, puis en absence de traitement, à la chute des moellons, ou briques, déchaussés.

Le vieillissement des matériaux constitutifs des maçonneries: là encore l'action des eaux est prépondérante, qu'elles soient agressives (eaux séléniteuses, eaux porteuses de pollutions chimiques externes) ou très pures. On notera également le cas des tunnels construits en milieux urbains ou industriels ainsi que l'action du gel qui se traduit par la destruction par éclatement des moellons lors des cycles gel-dégel.

Une attention particulière doit être portée aux ouvrages un peu plus récents, construits en béton: les bétons utilisés dans les ouvrages anciens étaient souvent moins élaborés que les matériaux modernes avec des dosages moins précis qu'actuellement, des agrégats imparfaits, sans s'assurer de la compatibilité entre liants et agrégats. Ils sont facilement susceptibles d'évolutions en particulier pour ceux exécutés en réparation ponctuelle. On notera les phénomènes de délavage (plus préjudiciables que les phénomènes analogues concernant le mortier des joints dans la maçonnerie puisque, dans ce

cas, c'est l'ensemble du revêtement qui est détruit et non pas seulement un de ses éléments constitutifs), l'importance, une fois de plus, des agressions chimiques.

L'altération des étanchéités, se traduisant par la fissuration des enduits mécaniques ou l'altération des enduits bitumés, permet l'action des eaux sur la structure, accélérant ainsi les phénomènes d'altération rappelés ci-dessus.

Enfin, il ne faut pas négliger les phénomènes de colmatage des réseaux d'assainissement internes aux ouvrages, qui peuvent remettre en question les conditions d'exploitation.

■ Les désordres «évolution de l'environnement»

Bien connus en géotechnique, ce sont essentiellement des actions mécaniques. Elles affectent de manière fondamentale les ouvrages souterrains, qui, par définition, sont en contact étroit avec l'encaissant. Les dissolutions, les gonflements, les pertes de butée consécutives à la diminution des caractéristiques mécaniques des terrains, les liquéfactions des sols (le phénomène de « pumping » sous voie ferrée), les modifications de l'hydrologie, qu'elles soient d'origine externe (imperméabilisation des sols par l'urbanisation, concentration des venues d'eaux, pertes d'eaux dans des ouvrages voisins) ou internes (phénomènes de drains constitués par le tunnel lui-même, pertes dans les réseaux d'assainissement), modifications dues aux travaux à proximité ou dans l'ouvrage, évolution des terrains rocheux à proximité des ouvrages, par relaxation des contraintes, fluage, lessivage des diaclases, sont potentiellement dangereux pour les ouvrages et accélèrent le vieillissement.

En premier lieu, il faut souligner que, pour les tunnels anciens, la présence même du revêtement présuppose dans la plupart des cas une mauvaise tenue du rocher encaissant, car avant

ces quelques dernières décennies, lorsque le terrain présentait une stabilité satisfaisante, on faisait l'économie du revêtement. Et lorsque les tunnels sont revêtus, il n'est pas possible d'observer directement l'évolution du terrain encaissant, le problème pour le gestionnaire du tunnel est donc de savoir quelles sont les sollicitations imposées au revêtement et à partir de quel moment elles deviennent trop fortes, afin de pouvoir faire le nécessaire pour, soit décharger, soit renforcer le revêtement.

C'est l'examen détaillé des tunnels au travers de la surveillance réglementaire, exposée dans le dossier précédent, qui renseigne sur les évolutions du revêtement et du terrain encaissant. Pour assurer une connaissance approfondie de l'état des structures, des caractéristiques du terrain et de leur interaction, la SNCF met en œuvre des campagnes d'investigations adaptées aux différents types de structure concernés. Ces campagnes sont menées le plus souvent sans impact sur l'exploitation à la faveur des intervalles naturels entre les circulations. Les éléments recueillis vont permettre de porter un diagnostic et de proposer les mesures et travaux qui s'imposent pour assurer l'aptitude au service. Les outils destinés à fiabiliser ce diagnostic sont présentés dans un autre dossier de ce numéro spécial. ■



Gilles PARADIS

Adjoint au Chef de la Division Tunnels pour le Génie Civil et les Équipements du Département des Ouvrages d'Art de la Direction de l'Ingénierie de la SNCF



Patrick THIAUDIÈRE

Expert Géologue au Département des Ouvrages d'Art du Patrimoine à la Division Tunnels de la Direction de l'Ingénierie de la SNCF