

RÉNOVATION DES TUNNELS S.N.C.F.

TECHNIQUES DE RÉPARATIONS

BÉTON PROJETÉ. ANCRAGES ⁽¹⁾

Jean ÉRAUD

*Ingénieur principal adjoint à la Division des Tunnel
du Département des Ouvrages d'Art
de la Direction de l'Équipement de la S.N.C.F.*

Comme nous l'avons dit dans notre premier article, lorsqu'un revêtement de tunnel est par trop dégradé l'ingénieur a le choix entre sa reconstruction complète, son chemisage en béton coffré ou son renforcement soit par anneaux séparés soit par coque en béton projeté associée ou non à des ancrages.

C'est de ce dernier mode de confortement que nous traiterons ici.

I. — TECHNOLOGIE DU BÉTON PROJETÉ

La technique de la projection du béton a vu le jour aux environs de 1915 aux États-Unis et s'est rapidement diffusée dans le monde à partir de 1920.

Les principes de cette technique ont peu varié mais ses progrès sont dus à l'amélioration de la qualité des ciments, aux perfectionnements du matériel de projection et à l'utilisation d'adjuvants chimiques qui ont permis d'élargir son champ d'application.

1. Gunite

Depuis de nombreuses années le mortier projeté ⁽²⁾ est utilisé à la S.N.C.F. sous forme d'enduits au « cement-gun » armé ou non et cette technique a reçu une large application lors de l'électrification des lignes principales S.N.C.F. en vue de la confection de bandes étanches au-dessus des caténaires.

⁽¹⁾ Cet article fait suite à celui paru dans le numéro de septembre de cette revue et sera suivi de quatre autres articles qui paraîtront dans des numéros ultérieurs.

⁽²⁾ Le mortier projeté désigné généralement par le terme « gunite » est un matériau projeté dans lequel les granulats sont de faibles dimensions (selon les recommandations A.F.T.E.S., $\varnothing \leq 5$ mm).

Dans les exemples de confortement de tunnel qui seront donnés dans cet article, il ne sera question que de « béton projeté ».

De l'expérience de nombreux chantiers il ressort les principes suivants.

1° L'étanchement ne peut être obtenu par la seule mise en place d'un enduit d'intrados que si la maçonnerie est saine et résistante et les venues d'eaux peu abondantes.

2° Si les venues d'eaux sont importantes, le revêtement doit être préalablement assaini d'une manière permanente, soit par drainage, soit par injection, de sorte que l'enduit n'agisse plus que pour compléter l'étanchement.

3° Dans tous les cas, pour réaliser une exécution correcte de l'enduit d'intrados il faut :

- purger préalablement la maçonnerie de ses éléments instables;
- préparer soigneusement la surface pour l'accrochage (décapage, lavage, dégarnissage des joints, etc.);
- mettre localement et provisoirement la surface à l'abri des eaux d'infiltration et de ruissellement.

Des essais d'enduits au mortier de ciment ont été exécutés par la S.N.C.F. en 1964, ⁽³⁾ suivant cinq modes de mise en œuvre :

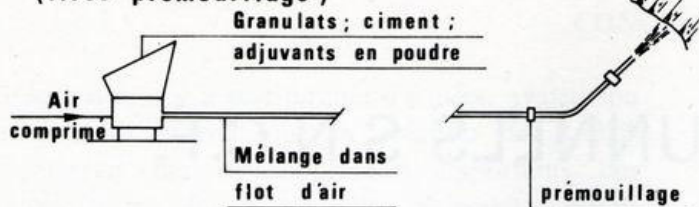
- mortier aéré, manuel avec ou sans accélérateur de prise, au « cement-gun » avec ou sans accélérateur de prise.

Appliqués sur huit types de maçonneries différents, avec ou sans traitement préalable des supports, ils ont en ce qui concerne l'enduit au « cement-gun » dosé à 500 kg de ciment par mètre cube donné les résultats suivants.

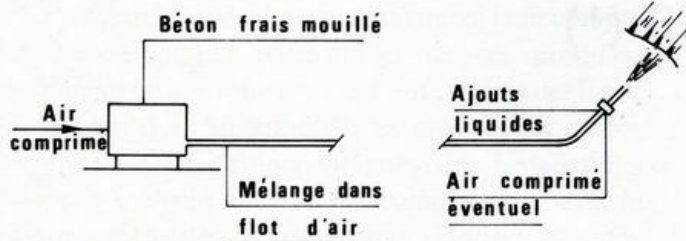
Résistance à la traction dans l'enduit :
sans accélérateur : 21,9 bar (moyenne);

⁽³⁾ Voir article de MM. MARCHAND et CORMIER, *R.G.C.F.*, septembre 1968.

PROJECTION PAR VOIE SECHE (Avec prémouillage)



PROJECTION PAR VOIE MOUILLEE A FLUX DILUE



PROJECTION PAR VOIE MOUILLEE A FLUX DENSE

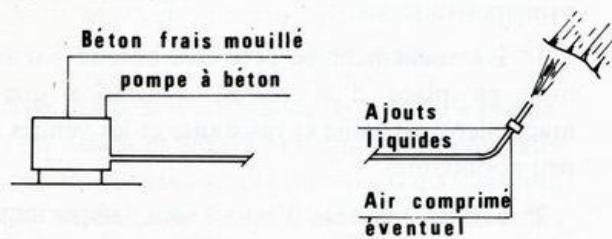


Fig. 1. — Les différentes techniques de projection du béton.

avec accélérateur : 14,4 bar.

Contrainte moyenne d'adhérence sur le support :

sans accélérateur : 12,3 bar;

avec accélérateur : 10,9 bar,

avec de meilleurs résultats sur béton et sur brique de bonne qualité (de laitier ou surcuite) et de moins bons résultats avec les briques ordinaires (résistance moyenne à la traction : 7 bar).

Porosité moyenne :

sans accélérateur : 17 %;

avec accélérateur : 23 %.

Perméabilité :

sans accélérateur : $0,4 \cdot 10^{-8}$ cm/s;

avec accélérateur : $5,7 \cdot 10^{-8}$ cm/s.

En vue de vérifier l'effet du vieillissement ces essais ont été repris en 1979. Ils ont confirmé le net avantage de la projection au « cement-gun » sur les procédés manuels.

Alors que ces derniers accusent des chutes de résistance, les valeurs obtenues pour les résistances à la traction et l'adhérence dans le procédé « cement-gun » se trouvent non seulement confirmées mais même améliorées 15 ans plus tard.

2. Béton projeté

Il existe actuellement deux grandes techniques de projection :

- par voie sèche (avec ou sans prémouillage à la lance);
- par voie mouillée (à flux dense ou à flux dilué) (fig. 1).

1° MÉTHODE PAR VOIE SÈCHE

a) Voie sèche normale

Dans la méthode par voie sèche, le mélange granulats-ciment est propulsé à grande vitesse par de l'air comprimé dans la conduite menant à la lance. La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation, introduite à moins de 20 cm de la sortie à l'air libre du mélange est finement dispersée et se mélange au jet qui comprend alors tous les éléments du béton.

La quantité d'eau ajoutée n'est pas conditionnée par la manœuvrabilité du béton dans le tuyau de transport. Elle peut donc être réduite au minimum compatible avec la tenue du béton en place et la bonne hydratation du béton. Comme par ailleurs la « voie sèche » permet de projeter des mélanges faiblement dosés en ciment, on voit qu'avec cette méthode de projection le retrait et la fissuration peuvent être notablement réduits.

Au début de la projection sur le support les premiers éléments rebondissent et seuls les éléments fins peuvent s'y incruster : l'eau et le ciment dans un premier temps, puis les grains de sable et enfin les graviers qui pénètrent dans la couche de mortier ainsi formée. Par la suite le martèlement énergétique des agrégats favorise la pénétration des précédents et assure la compacité.

Dans cette technique on constate que le rebondissement (donc les pertes) est important, qu'il affecte principalement les gros agrégats et qu'il est plus important près du support qu'au voisinage du parement.

Ceci se trouve dans une certaine mesure compensé par deux avantages :

- une bonne adhérence au support liée au surdosage en ciment au voisinage de la surface d'application;
- la limitation de la fissuration sur le parement vu, due à la relative pauvreté en ciment de la zone en contact avec l'extérieur.

Nous pensons que seule cette méthode possède les qualités de résistance d'adhérence et de faible retrait indispensable dans des travaux localisés de réparation d'ouvrage en béton (*) mais force est de reconnaître

(*) Voir article de M. RESSE, *Cahier technique du moniteur*, janvier 1977.

qu'elle produit beaucoup de poussière à la lance. En milieu clos elle est donc difficilement supportable et c'est pourquoi sur nos chantiers elle a toujours été remplacée par la méthode par voie sèche « avec prémouillage à la lance » légèrement moins polluante.

b) Voie sèche avec prémouillage

Depuis plus de 7 ans déjà que la S.N.C.F. procède à son programme « en grand » de rénovation de tunnels, c'est en effet cette méthode qui a été presque exclusivement employée.

Dans cette méthode l'apport d'eau se fait en amont de la lance à une distance plus ou moins importante. Avec ce système le frottement du mélange hydraté dans le tuyau entraîne une diminution de la vitesse à la sortie. Cette vitesse pour un diamètre donné de flexible sera donc d'autant plus faible que le prémouillage sera fait à une plus grande distance de la lance.

C'est pourquoi dans cette méthode pour compenser cet inconvénient, on utilise généralement des tuyaux de diamètre supérieur à ceux utilisés par la voie sèche classique (\varnothing 70 ou 80 très souvent) la distance entre l'anneau de mouillage et la lance étant de l'ordre de 3 m environ (fig. 2).

En adoptant ainsi pour chaque nature de travail et à la distance entre la machine à projeter et la lance, un diamètre de tuyau donné et une distance de prémouillage, cette méthode permet tout en réduisant en partie les poussières et les retombées d'obtenir des résultats presque aussi satisfaisants qu'avec la méthode « voie sèche classique ».

Quelle que soit la méthode employée (avec ou sans prémouillage) on peut donc dire que la projection par voie sèche présente de grands avantages :

- vitesse de transport élevé, et possibilité de transport des granulats sur une longue distance;
- grande force de projection assurant un compactage énergétique de la couche projetée et une bonne adhérence au support;
- possibilité de réduction d'eau et du dosage du ciment (en vue de limiter les effets du retrait et de la fissuration),

mais aussi de sérieux inconvénients :

- nécessité de stocker les granulats à l'abri afin qu'ils contiennent moins de 5 % d'eau;
- pollution importante due à la production de poussière à la lance, et aux pertes par rebonds (qui atteignent parfois 50 %).

Les machines utilisées peuvent être à sas (Torkret) mais plus généralement à rotor (Aliva, Meynadier) et permettent d'utiliser des granulats de \varnothing 16 et plus.



Fig. 2. — Tunnel de Belleville : projection de béton par voie sèche avec prémouillage.

Pour répondre aux besoins des chantiers S.N.C.F. certaines entreprises ont équipé de véritables trains à béton, autonomes, dont l'équipement (stockage, dosage, alimentation, machine à projeter) répond à tout ce qu'on est en droit d'exiger d'une centrale à béton (fig. 3).

2° MÉTHODE PAR VOIE MOUILLÉE

Dans la projection par voie mouillée, la machine propulse le mélange (granulats, ciment, eau sans accélérateur de prise) préalablement gaché selon les procédés traditionnels :

a) en voie mouillée « par flux dilué », la propulsion du mélange mouillé est réalisée par un jet d'air comprimé qui l'entraîne dans la conduite en le suspendant dans un flot d'air.

b) en voie mouillée « par flux dense », la propulsion du mélange est assurée par l'action d'une pompe à béton, la conduite ne recevant pas d'air et étant entièrement remplie par le béton préalablement gaché.

Dans la méthode par « flux dilué », le béton étant mélangé à de l'air comprimé dans le tuyau, les

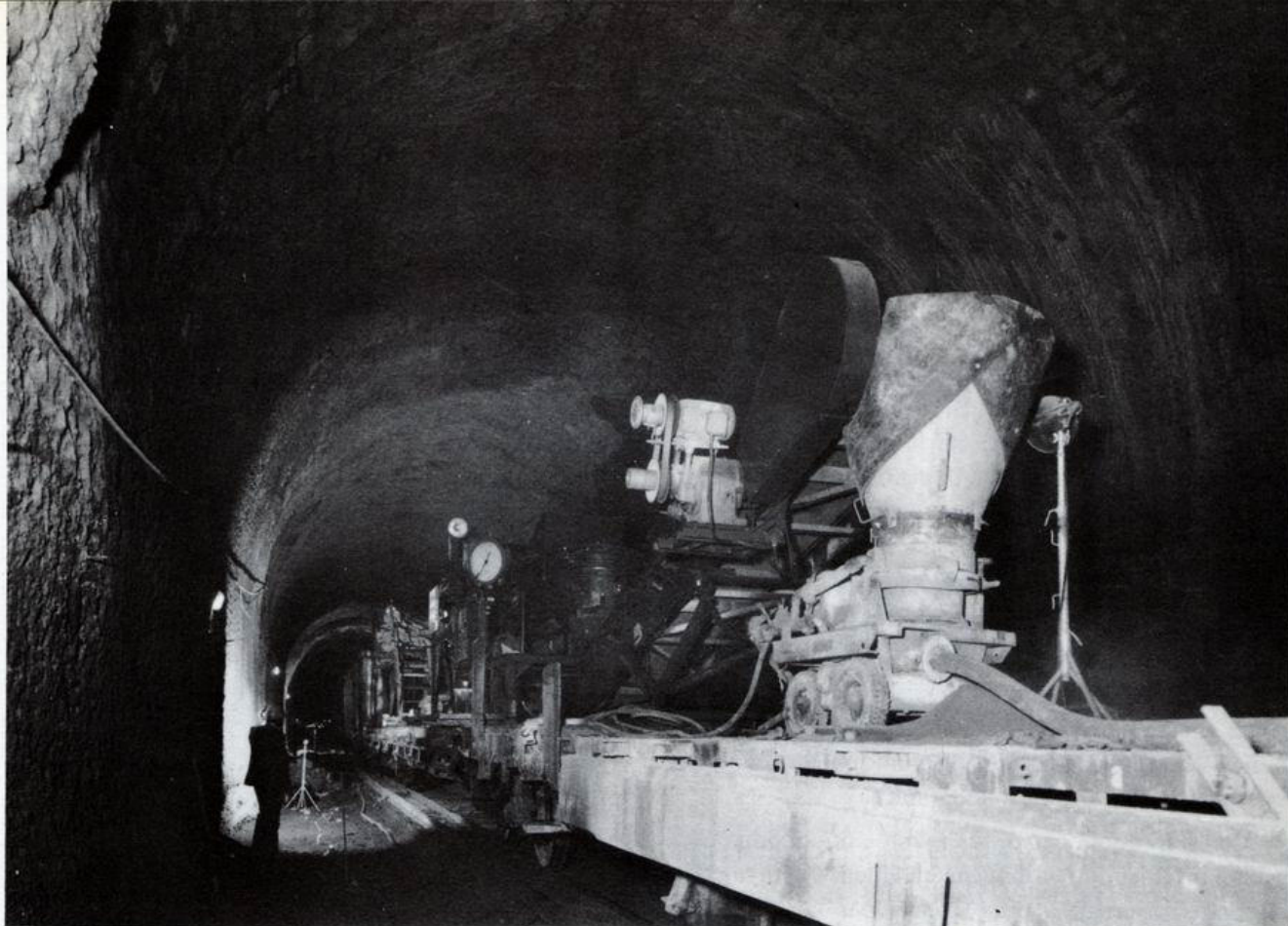


Fig. 3. — Tunnel de Belleville : centrale de projection du béton.

(Cl. Baranger.)

frottements sont moins importants que par « flux dense ». Quoique inférieure à celle de la voie sèche, la force de projection peut être plus grande qu'en « flux dense ». En fait cette forme de projection est très peu utilisée dans les tunnels de la S.N.C.F. alors que celle par « flux dense » tend à s'imposer de plus en plus. C'est donc cette dernière méthode que nous traiterons plus particulièrement.

Dans cette méthode la force de projection est généralement faible et la mise en place du béton ne peut se réaliser sans adjonction d'un accélérateur de prise puissant. Des dispositifs spéciaux au niveau de la lance permettent donc d'introduire cet adjuvant (généralement du silicate de sodium en solution concentrée) et de l'air comprimé pour augmenter si nécessaire la force de projection.

Les pertes par rebonds sont très souvent, trois fois moindres qu'avec la voie sèche. On n'observe donc qu'une faible « dérive » entre la composition du béton en place et la formulation à la fabrication. Le rapport E/C restant constant permet ainsi d'automatiser plus aisément ce type de projection et par là même d'en améliorer encore les rendements.

Par contre comme tout accélérateur de prise, qu'il soit physique (action de la chaleur) ou chimique (action de la solvatisation) le silicate de sodium agit sur la germination et la croissance des cristaux. Il en résulte une diminution des caractéristiques mécaniques qui ne

peut être compensée que par un surdosage qui peut dépasser de 30 % celui couramment admis pour la voie sèche.

Les essais faits au Cemex⁽⁵⁾ (Aix-en-Provence) en 1974 ont montré que pour obtenir un R_c de 250 bar à 28 jours sur cylindre, le dosage doit être de l'ordre de 480 kg/m³. Ils ont fait ressortir également que la composition optimale est de 65 % de sable et de 35 % de gravillon et qu'indépendamment du terme silicate il convient, pour avoir des caractéristiques mécaniques acceptables, que le rapport eau/ciment reste limité (0,5 et en tout cas inférieur à 0,55).

D'autres essais effectués par le Département des Ouvrages d'Art de la S.N.C.F. en 1975 et 1976 ont confirmé cette façon de voir.

Le bon passage du béton à la pompe qui est pourtant essentiel dans cette méthode de projection doit donc être obtenu sans surdosage en eau. Ceci est désormais possible en fabriquant un béton avec un slump-test de 6 à 8 cm et en ajoutant dans la machine un super-fluidifiant⁽⁶⁾ permettant d'obtenir des mélanges faciles à pomper, de slump-test compris entre 14 et 17 cm.

⁽⁵⁾ Voir notamment la communication de M. BERTRANDY aux journées d'études « Les procédés modernes de construction des tunnels » des 16-18 octobre 1974, et *Annales I.T.B.T.P.*, n° 343, octobre 1976.

⁽⁶⁾ Algiplast de la Société Chryso, Sika Fluid de la Société Sika, Lanco Gunite de la Société Lanco, pour les essais Cemex et S.N.C.F.

De ce qui précède il ressort que les avantages de la projection par voie humide tiennent surtout à :

- sa faible pollution;
- ses rendements améliorés;
- son aptitude à l'automatisation,

car en contrepartie l'emploi indispensable d'adjuvant pénalise les résistances mécaniques et la compacité du béton en place ainsi que l'adhérence au support. Les effets du retrait se révèlent par ailleurs plus importants par cette méthode que par la voie sèche.

Ce type de projection par voie humide nécessite donc un suivi du chantier très strict, et des essais en nombre suffisant tant de compression que de traction et d'adhérence.

Malgré ses inconvénients, la voie mouillée paraît appelée à de grandes applications dans les prochaines années dans les travaux en tunnels. Elle est d'ailleurs déjà adoptée pour de gros chantiers (Tunnel de la Croix de l'Orme, du Col Babe, de la Négresse) dont les entreprises adjudicataires se sont notamment équipées de machines à pistons à gros rendements (Montaburo et Putzmeister).

II. TECHNOLOGIE DES ANCRAGES

Les boulons d'ancrage bien connus des mineurs sont de plus en plus utilisés dans les tunnels S.N.C.F.

Ils trouvent une large application comme confortement provisoire chaque fois que des démolitions sont nécessaires (rescindement en voûte, reprises en sous-œuvre de piédroits) et plus particulièrement quand la géométrie du tunnel ne permet pas l'emploi de cintres. Ils sont couramment utilisés pour la fixation d'éléments de soutènement tels que cintres, cintres partiels, cadres de maintien pour ouverture de fenêtres dans le revêtement.

On les emploie également très fréquemment pour assurer un confortement définitif des tunnels que ceux-ci soient revêtus ou non :

- en l'absence de revêtement, en terrain fissuré, les ancrages traversant les différents plans de fracturation contribuent, en « armant » le terrain, à améliorer ses caractéristiques mécaniques. Par leurs plaques d'appuis ils permettent de maintenir en place les blocs rocheux instables en surface;
- dans les tunnels revêtus, les boulons d'ancrages jumelés le plus souvent avec des injections d'extrados, ont pour effet d'associer au revêtement existant un anneau de terrain et de le faire participer à la résistance de l'ensemble.

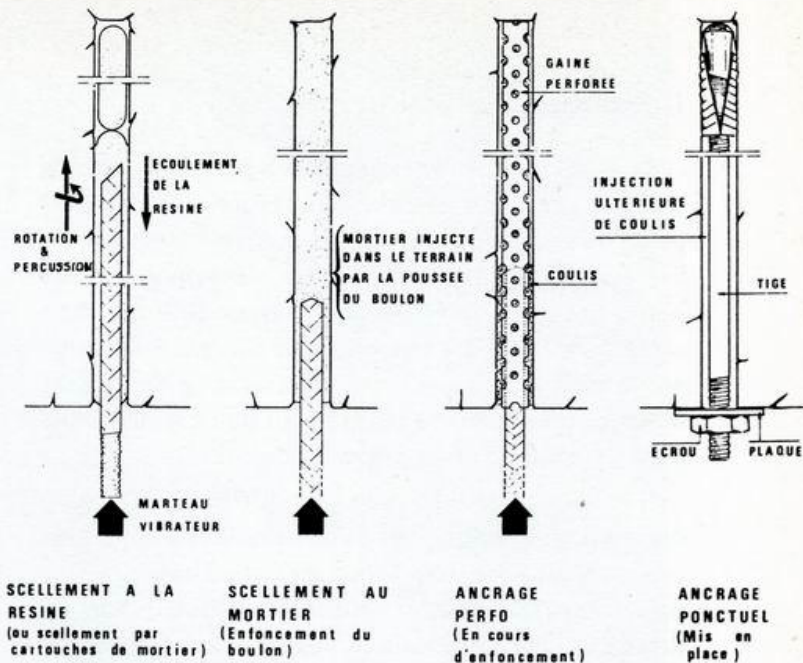


Fig. 4. — Différents types de scellement des ancrages.

Combiné avec un rejointement mécanique soigné le boulonnage peut déjà apporter à bon compte un renforcement important de la stabilité d'un tunnel mais plus généralement ce confortement est encore amélioré par la mise en place d'une coque en béton projeté associée aux ancrages. C'est de ce type de remise en état dont nous parlerons plus loin, en citant quelques exemples de chantiers récents.

Si en technique minière, les flèches des toits de mine peuvent être importantes et la capacité portante des boulons entièrement mobilisée, ce n'est pas le cas pour le renforcement définitif des tunnels S.N.C.F. revêtus : les allongements des boulons ne peuvent être que modérés, faute de quoi ils s'accompagneraient de déformations importantes du revêtement incompatibles avec sa bonne tenue (et les gabarits à dégager).

La recherche de contraintes modérées dans les boulons d'une part, la prise en considération de l'atmosphère corrosive dans les tunnels d'autre part, a donc conduit la S.N.C.F. à n'utiliser que des ancrages passifs ⁽⁷⁾ de diamètre assez gros (20 à 32 mm) scellés sur toute leur longueur (fig. 4).

Des aciers à haute limite élastique (genre Dywidag Ø 16 par exemple) ont toutefois été utilisés exceptionnellement quand la longueur des ancrages et les conditions de travail dans le tunnel (voie exploitée par exemple) nécessitaient la mise en place d'armatures pouvant être lovées ou manchonnées.

Les boulons le plus couramment utilisés pour le confortement définitif sont donc des boulons dits « à ancrage réparti » dont le scellement est de deux types.

⁽⁷⁾ Contrairement aux ancrages dit « actifs » qui sont mis en tension après pose.

1. Scellement à la résine polyester

Ce type de scellement convient en particulier dans le rocher sain à faible porosité (d'interstices et de fissures) permettant un calibrage parfait du trou d'ancrage. Le jeu entre boulon et terrain doit correspondre aux prescriptions du fabricant des charges. Il doit être en général supérieur à 4 mm pour que la couche de résine polymérisée ait une bonne adhérence avec tige et massif, mais inférieur à 10 mm pour que le mélange des deux produits se fasse convenablement ⁽⁸⁾.

Il existe de nombreux modèles différents, mais tous conçus pour le mélange *in situ* de leurs deux composants contenus dans une enveloppe : le mastic à base de résine polyester et le durcisseur sous forme d'un bâtonnet ou de pulvérulent noyé dans le mastic. Ce bâtonnet est quelquefois logé dans un tube de verre qui assure la rigidité de la charge. Dans d'autres cas, cette rigidité est assurée par un tube extérieur en filet « plastique » qui est détruit lors de la mise en place de la tige.

Après introduction des charges, le boulon est mis en place à l'aide d'une perforatrice qui assure à la fois la poussée et la rotation (plus de 200 tr/mn).

La mise en œuvre de ces boulons à la résine nécessite un personnel qualifié car il faut obtenir nécessairement un bon brassage des produits. Sur certains chantiers pour parfaire le remplissage, ou a dû procéder à un complément d'injection de résine après mise en place du boulon.

Il faut noter aussi que ce type de scellement n'est pas très aisé à réaliser en présence d'eau.

2. Scellement au mortier

On distingue ici trois types de techniques.

a) La technique par remplissage préalable de mortier

Elle est particulièrement recommandée dans les mauvais terrains fissurés ou très hétérogènes, et où il est impératif de remplir les vides.

Le mortier est injecté par une pompe à béton où à air comprimé en fond de trou, et à la fin du remplissage un bouchon peut être mis en place en attendant l'introduction du boulon.

Celui-ci est enfoncé à l'aide d'un marteau-vibreur et la poussée sur le boulon contribue au bon remplissage des vides de la maçonnerie ou du terrain.

b) La technique « par cartouches de mortier »

Dans cette technique qui s'apparente à celle du

scellement continu par résine, les cartouches sont ici remplies d'un mortier à prise rapide ⁽⁹⁾. Ces cartouches humidifiées en les immergeant 3 minutes dans un bac sont introduites dans le trou de forage à l'aide d'un bourroir. Le boulon est mis en place en poussée-vibrante par un jumbo ou un marteau perforateur. L'introduction de la tige d'ancrage doit se faire dans les 10 minutes qui suivent l'immersion de la cartouche.

c) La technique Perfo

Cette technique consiste à introduire dans le forage un tube métallique constitué de deux demi-coquilles perforées, remplies préalablement de mortier.

Le boulon torsadé ou crenelé, de diamètre approprié au diamètre du tube est enfoncé dans le tube Perfo déjà introduit dans le forage. Il fait effet de piston et chasse le mortier par les trous percés dans le tube ce qui assure le remplissage de l'espace annulaire.

Le choix du diamètre du trou approprié aux diamètres du tube et du boulon conditionne ce bon remplissage.

Pour les travaux à caractère provisoire (soutènement immédiat de cintres ou de voussoirs-fonte) on est amené à utiliser un autre type de boulonnage, le *boulonnage à ancrage ponctuel*.

Ce type d'ancrage mécanique s'obtient par enfoncement, dans la paroi du trou, de deux demi-coquilles à expansion écartées par un coin forgé déplacé par vissage de la tige. Ces coquilles (généralement en fonte malléable) en s'écartant s'ancrent au terrain (ou à la maçonnerie) sollicité en compression radiale. Ce type de boulonnage auto-serrant serait vite corrodé et risquerait d'être à l'origine de venues d'eau à l'intrados du tunnel s'il n'était pas injecté ultérieurement. Son emploi et son maintien en place dans les tunnels ferroviaires suppose donc qu'il puisse être par la suite injecté soit par un coulis de ciment, soit par une résine. On réalise en fait un scellement mixte capable de pallier à la défaillance toujours possible d'un ancrage ponctuel lié à la qualité du terrain qui peut évoluer défavorablement.

Nous citerons pour mémoire les *boulons de plastique armé fibres de verre* qui ont des résistances à traction comparables à celles des boulons acier (60 kg/mm²). Ces ancrages sont généralement scellés sur toute leur longueur par des charges à base de résine polyester et ont trouvé plus particulièrement un emploi en atmosphère corrosive (présence de gypse, ou d'eaux pures).

⁽⁸⁾ Suivant prescriptions de la Société Celtite.

⁽⁹⁾ A base de ciment prompt et fondu pour les scellements Goldenberg.



Fig. 5. — Essais de voûtes renforcées par une coque en béton projeté.

Nous noterons également que sur certains chantiers (Tunnel des Mercières par exemple, avec des terrains constitués d'alluvions fluvio-glaciaires), un bon scellement des boulons n'a pu être obtenu qu'avec injection d'un coulis de ciment après mise en place des boulons. Dans cette technique, le boulon est introduit dans le trou en même temps qu'un tuyau plastique de faible diamètre. L'injection se fait tout d'abord à fond de trou et le tuyau est retiré au fur et à mesure de l'injection. Cette façon de procéder permet de remplir au mieux tous les vides autour de la barre mais ne peut se faire qu'avec un coulis peu ou pas chargé en sable (et non pas un véritable mortier).

III. — ESSAIS DE VOUTES RENFORCÉES PAR UNE COQUE EN BÉTON PROJETÉ

Avant de citer quelques exemples d'application du béton projeté dans les tunnels S.N.C.F., nous dirons quelques mots des essais à grande échelle qui ont été menés par la S.N.C.F. en commun avec le Centre d'Études des Tunnels (C.E.T.U.), la R.A.T.P. et le Centre d'Études du Batiment et des Travaux Publics (C.E.B.T.P.), en vue d'étudier l'effet du renforcement de voûtes fissurées par une coque en béton projeté (fig. 5).

1. Principe des essais

La voûte est chargée par paliers jusqu'à fissuration. Les charges sont bloquées; puis la voûte est renforcée par une coque en béton projeté. L'ensemble est alors de nouveau soumis à une augmentation de charges jusqu'à fissuration dans la coque, puis jusqu'à rupture de l'ensemble.

2. Description des essais

Le prototype étant une voûte plein cintre de 4 m de rayon avec des piédroits de 1,50 m de hauteur, les modèles faisant l'objet des essais ont été réalisés avec une échelle de réduction de 3,6. Quatre voûtes ont été essayées jusqu'à ce jour :

- la voûte 1 en maçonnerie ($E=80\,000$ bar, $R_c=50$ bar) (coque de 4 cm équivalent à 14 cm réel);
- la voûte 2 en maçonnerie ($E=55\,000$ bar, $R_c=42$ bar) (coque de 3 cm équivalent à 11 cm réel);
- la voûte 3 en béton ($E=300\,000$ bar, $R_c=170$ bar) (coque de 3 cm équivalent à 11 cm réel);
- la voûte 4 en maçonnerie ($E=38\,000$ bar, $R_c=17,3$ bar) (coque de 3 cm équivalent à 11 cm réel).

	Voûte 1 maçonnerie	Voûte 2 maçonnerie	Voûte 3 béton	Voûte 4 maçonnerie
	Voûte non renforcée			
Début de microfissuration.	Environ 9	Environ 7	Environ 14	Dès la mise en place du dispositif du chargement
Début de la fissure visible.	12	8 à 9	18	
Charge maximale.	15	10	19	7
Charge de blocage pendant renforcement.	12	7	15	5
	Voûte renforcée			
Début de la seconde microfissuration.	—	11 à 15	21 à 25	7
Début de la fissuration visible.	27	23	28	11 décollement 22-23
Charge ultime.	50	40	34	32
Coefficient de renforcement R_{f1} ⁽¹⁾	2,2	2,6 à 2,9	1,6	—
Coefficient de renforcement R_{f2} ⁽²⁾	3,3	4	1,8	4,6
⁽¹⁾ $R_{f1} = \frac{\text{charge de rupture avec confortement}}{\text{charge de rupture sans confortement}}$ ⁽²⁾ $R_{f2} = \frac{\text{souplesse de la maçonnerie fissurée non renforcée}}{\text{souplesse de la maçonnerie confortée par la coque}}$				

Le tableau ci-dessus résume les étapes caractéristiques du chargement, les efforts étant exprimés en tonnes-forces pour un vérin vertical ⁽¹⁰⁾.

Sans entrer dans les détails de ces essais qui feront l'objet de publications ultérieures, on peut déjà dire que tous ces essais ont montré que le renforcement d'une voûte fissurée par une coque en béton projeté est un procédé efficace.

La raideur de la structure-composite et sa capacité de résistance à la rupture se trouvent augmentées très sérieusement et plus particulièrement pour les voûtes en maçonnerie dont les rigidités initiales sont inférieures à celle de la voûte béton.

La figure 6 fait apparaître le changement de comportement de la voûte d'essais n° 2 avant et après renforcement : on constate que la « rigidité » de la voûte en maçonnerie est sensiblement multipliée par 2,5 par l'adjonction de la coque en béton projeté.

La plupart des voûtes en tunnels étant constituées de maçonneries de moellons et briques, comportant de nombreuses articulations leur assurant une faculté de fissuration distribuée, ce procédé de renforcement par coque en béton projeté, que la S.N.C.F. a généralisé ces dernières années pour les travaux de remise en état de ses ouvrages, se trouve ainsi très justifié.

⁽¹⁰⁾ Pour chaque voûte, il y a quatre vérins.

IV. — QUELQUES CHANTIERS DE BÉTON PROJETÉ ET DE BOULONNAGE

IV.1. Confortement d'un tunnel non revêtu : le tunnel de Ners

1. Site du tunnel

Le tunnel de Ners est situé à 20 km au sud d'Alès sur la ligne Saint-Germain-des-Fossés à Nîmes. Il a été construit en 1836 et traverse sur une longueur de 396 m un éperon rocheux découpé par le Gardon d'Alès.

Le terrain encaissant est constitué d'un calcaire marneux traversé par un réseau de diaclases assez dense (espacement moyen 30 cm) et des petites fractures subverticales remplies le plus souvent de mylonite.

2. Problèmes posés. Choix de la solution

En zone non revêtue du tunnel, le rocher s'altère par une exfoliation parallèle au parement et il y a création de multiples fissures parallèles, verticales et très rapprochées.

Les niveaux marneux se décompriment et les feuillets horizontaux s'écartent ce qui permet à l'eau d'éroder rapidement ces joints.

Ces deux phénomènes d'altération mécanique provoquent le recul du parement et la création de hors-profil.

Pour toutes ces raisons, il est apparu nécessaire de revêtir les parties non maçonnées du tunnel, d'une couche de béton projeté et de procéder au boulonnage des strates et plus particulièrement en voûte.

3. Travaux

Les travaux de remise en état de ce tunnel ont été confiés à l'entreprise Amerec.

Ils se sont réalisés sous le couvert d'une voie unique temporaire (V.U.T.) qui a permis de travailler tantôt sur une voie, tantôt sur l'autre, grâce à de fréquents basculements.

En ce qui concerne plus particulièrement les zones de tunnel non revêtues, ces travaux comprenaient les phases suivantes.

3.1. PURGE ET DÉROCTAGES LOCALISÉS

En vue de ne laisser en place que du rocher sain et de dégager le gabarit projeté.

3.2. BOULONNAGE DU TERRAIN

Ce boulonnage destiné à recouper les fissures et diaclases devait être plus dense en voûte qu'en piédroit, et les ancrages orientés en tenant compte de la structure géologique et de la fracturation.

Il a été prévu des aciers à haute résistance \varnothing 20 crénelés, scellés à la résine, de densité et de longueur suivantes :

- en voûte 1 par mètre carré soit 11 au mètre de tunnel, longueur 3,00 m;
- en piédroit 1 par mètre de tunnel, longueur 2,00 m.

On a prévu également, pour assurer une liaison intime entre le terrain et la coque en béton projeté, des épingles \varnothing 20 de 0,60 m de longueur scellées à la résine, à raison de 3 par mètre carré en voûte et 4 par mètre carré en piédroits.

Le diamètre inhabituel de ces épingles trouvait sa justification dans la nécessité de clouer le terrain très diaclasé en surface.

3.3. REVÊTEMENT PRIMAIRE EN BÉTON PROJETÉ

Confection d'une première couche d'égailisation en béton projeté de 4 cm d'épaisseur minimale sur les parties les plus saillantes.

3.4. CAPTAGE ET DRAINAGE DES EAUX

Dans ce tunnel où les arrivées d'eau de pluie sont rares mais importantes et brutales, il était indispensable

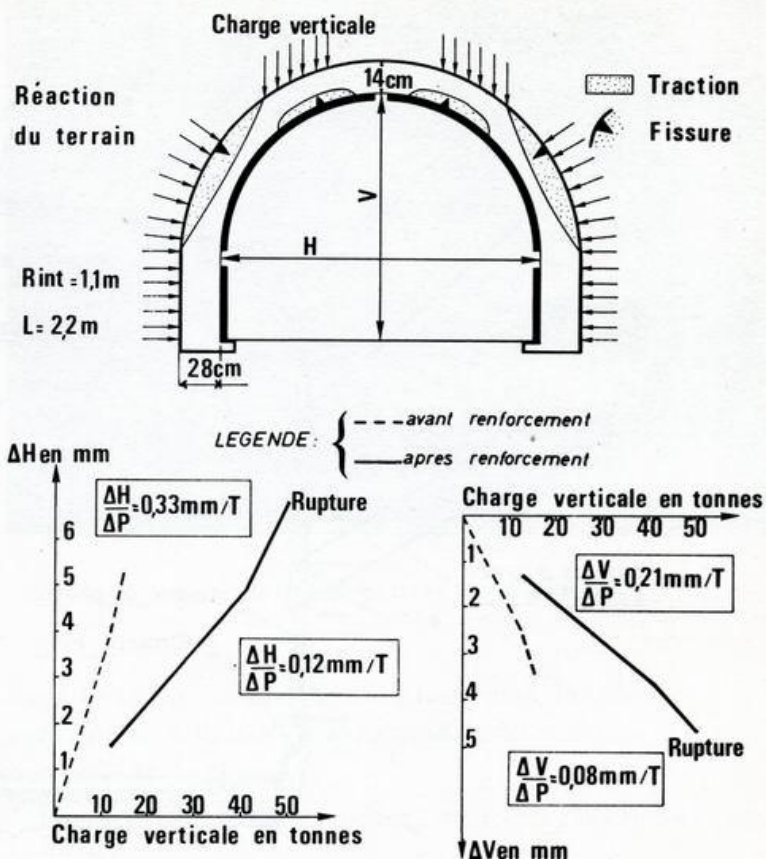


Fig. 6. — Renforcement par béton projeté (essais C.E.B.T.P.) : courbes efforts-déformations.

de créer un réseau de drainage propre à éviter toute surpression et toute circulation d'eau derrière la coque en béton projeté. Pour ce faire il a été prévu :

- l'exécution de 12 forages drainants de 3 et 4 m de profondeur suivant une auréole tous les 2,00 m de tunnel;
- la mise en place et le scellement sur la couche d'égailisation de béton projeté de canaux de drainage en CPV souple type Aliva suivant ces auréoles;
- des barbacanes en CPV \varnothing 80 en base des piédroits pour recueillir les eaux de ces canaux de drainage.

3.5. REVÊTEMENT DÉFINITIF EN BÉTON PROJETÉ

Ce revêtement comprenait :

- la mise en place d'un treillis soudé solidement fixé aux épingles et aux ancrages;
- la mise en œuvre d'une couche en béton projeté de 10 cm d'épaisseur.

La figure 7 donne une idée de l'ensemble de ces travaux qui se sont déroulés en 1977 sans rencontrer de problèmes particuliers.

Ce mode de traitement a également été adopté ces dernières années dans les parties non revêtues de quelques tunnels parmi lesquels on peut citer :

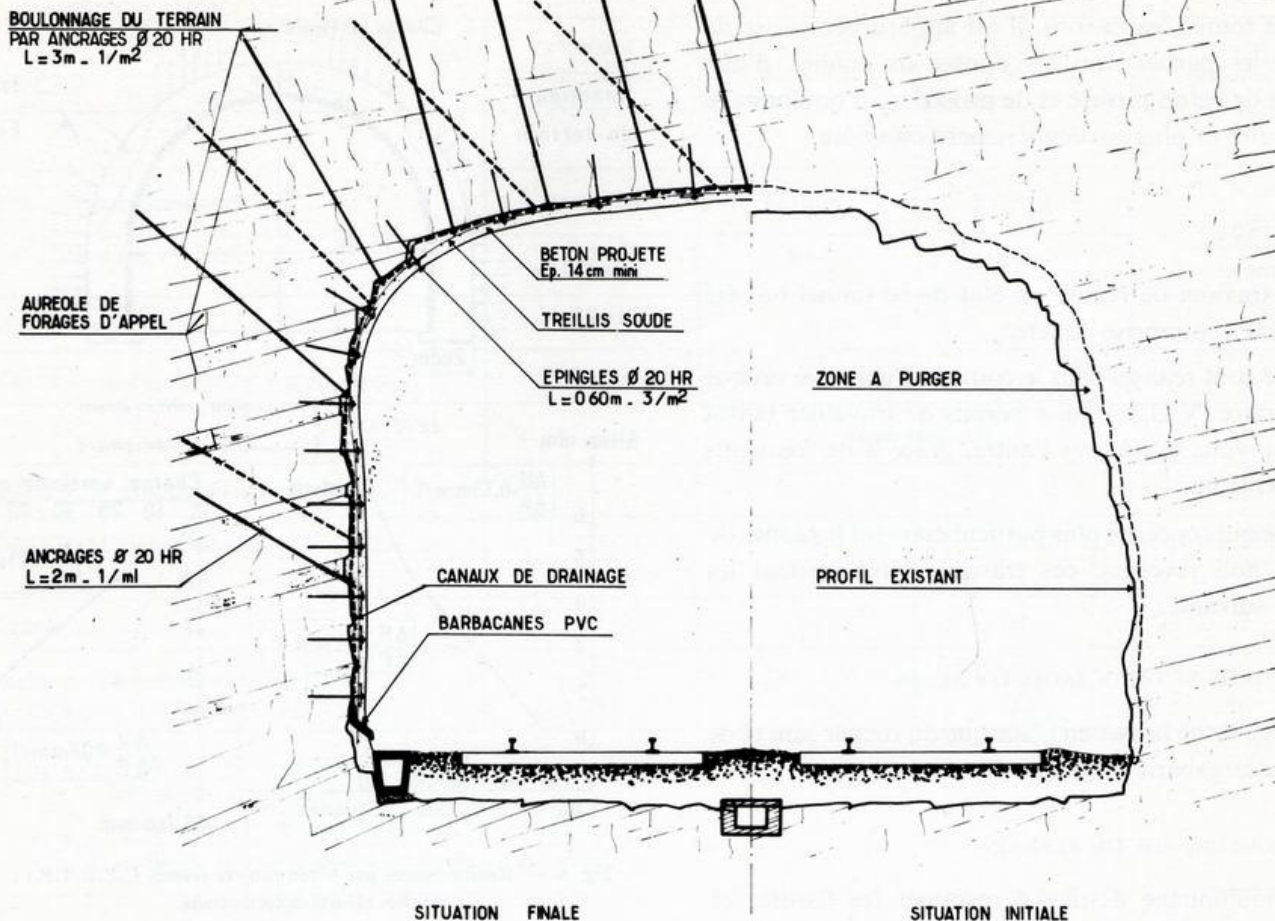


Fig. 7. — Coupe du tunnel de Ners.

- le tunnel de Volclair (Région de Clermont-Ferrand en 1978);
 - les tunnels de Rivière et Gueret (Région de Limoges en 1979),
- et trois chantiers actuellement en cours de travaux :
- les tunnels de la Croix de l'Orme, et du Col Babe (Région de Lyon);
 - le tunnel de Petafy (Région de Montpellier).

On peut également noter que sur la ligne Paris-Marseille, où la densité des circulations limite les possibilités d'intervention, la stabilité du rocher nu dans les tunnels de Vienne a pu être assurée par un boulonnage approprié (sans coque en béton projeté).

IV. 2. Remplacement d'un revêtement existant les tunnel des Corbinières

1. Site du tunnel

Le tunnel des Corbinières, d'une longueur de 635 m, construit de 1860 à 1862, se situe sur la ligne de Rennes à Redon.

Cet ouvrage a été percé dans une formation schisto-gréseuse que l'on peut décrire de la façon suivante :

- du PM 0 à 250 environ, c'est-à-dire côté Rennes, une zone de grès armoricain;
- du PM 365 à 635 environ, une zone de schistes de composition variable;
- entre ces deux zones, une succession de niveaux de marnes tendres et grès tendres, de grès marneux et quartzites, de cohésion et fracturation très variables.

La voûte, de type « parapluie » était en maçonnerie de brique de 22 à 60 cm d'épaisseur, non plaquée au terrain, mais renforcée et mise au contact avec celui-ci, tous les 2 m environ, par des nervures radiales complétées parfois par de petits piliers (fig. 8).

En retombée, cette voûte s'appuyait directement en piedroit sur le rocher non revêtu, souvent altéré, renforcé localement par des chevêtres en béton armé, des voutains ou des piliers en maçonnerie de brique ou de moellon de grès (fig. 9).

2. Problèmes posés. Choix de la solution

Des circulations d'eau, nombreuses dans ce massif très fracturé, avaient contribué à l'altération progressive du rocher, créant au niveau des assises de la voûte,

des affouillements qui avaient fait l'objet de consolidations diverses au cours des temps. De plus, on observait un vieillissement de la maçonnerie de brique de cette voûte.

Des réfections partielles de la voûte et de ses assises ne permettaient plus de garantir la sécurité des circulations. Aussi a-t-il été décidé de remplacer cette voûte en briques par une coque de béton projeté avec incorporation de cintres légers dans celle-ci, associée à un boulonnage du terrain.

3. Les travaux

3.1. TRAVAUX PRÉPARATOIRES

3.1.1. Travaux de voie

Mise en place, sous l'ouvrage, d'un tronc commun temporaire (T.C.T.) sur lequel passent, en voie unique banalisée, à 30 km à l'heure, les circulations.

Installation de part et d'autre du T.C.T. des chemins de roulement des portiques mobiles servant d'échafaudages et de protection des circulations lorsque le terrain est à découvert après la démolition de la voûte.

Création d'un chantier « Équipement S.N.C.F. » raccordé sur voie principale n° 2, dans l'ancienne gare de Fougeray-Langon à 4 km de la sortie du tunnel côté Redon.

3.1.2. Travaux de signalisation

Mise en place de la signalisation propre au T.C.T. :

- poste d'aiguillage à la tête côté Redon;
- signaux de protection, et de limitation de vitesse;
- installation des dispositifs de détection des chargements déplacés;
- protection des passages à niveau pour la circulation des trains de travaux;
- mise en place de sentinelles électriques pour la protection du personnel;
- installation des torches à flamme rouge à déclenchement électrique, des boutons de commande et dispositifs d'alerte et de réarmement dans le poste d'aiguillage.

3.2. TRAVAUX DE RÉFECTION

Ces travaux ont été réalisés par l'Entreprise Campenon-Bernard-Cetra.

3.2.1. Conditions de circulation

La circulation ferroviaire a été maintenue pendant toute la durée des travaux sur le tronc commun installé

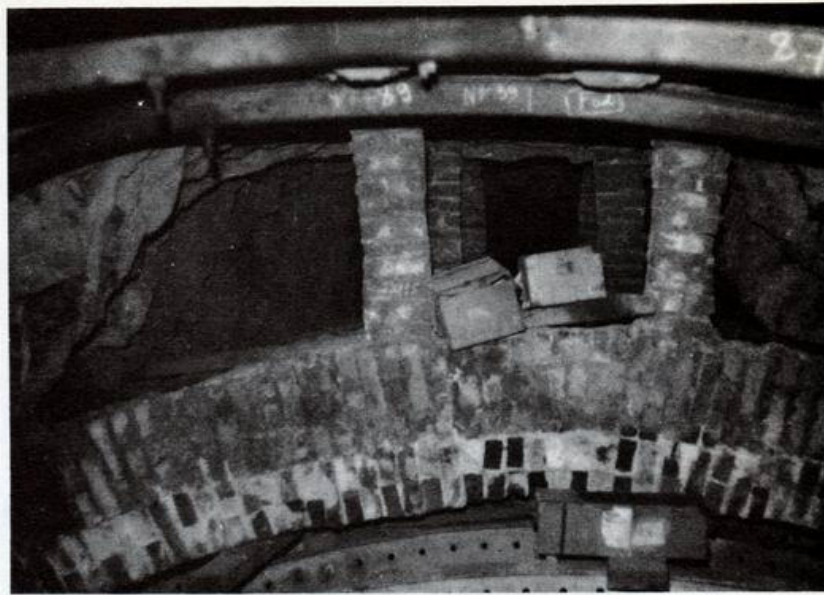


Fig. 8. — Aspect de la voûte du tunnel des Corbinières.

dans l'axe du souterrain. La vitesse était limitée en permanence à 30 km/h, même pendant les périodes de non-activité du chantier.

L'entreprise a donc été amenée à mettre en place dans le tunnel :

- sur les lieux de travail deux ensembles de six portiques « échafaudages » mobiles parfaitement rigides capables de résister à des chutes de blocs, dégageant le gabarit et comportant des systèmes de roulement et d'immobilisation.

Ces portiques assuraient également la protection de la voie dans les zones où le terrain mis à

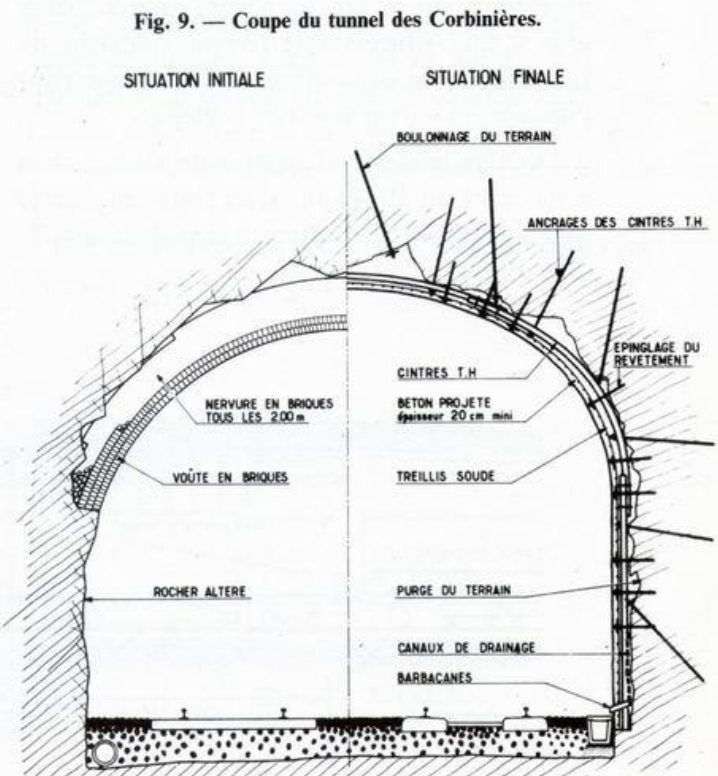


Fig. 9. — Coupe du tunnel des Corbinières.



Fig. 10. — Sortie du tunnel des Corbinières :
on distingue le portique, la voie de 75 cm et la clôture.

(Cl. Baranger.)

découvert par la démolition de la voûte n'était pas encore revêtu d'au moins une première couche de béton projeté;

- une voie de 75 cm dans l'espace disponible entre chaque piédroit et l'aire d'évolution des portiques, l'évacuation des déblais étant faite par berlines et locotracteurs. Les berlines étaient amenées à la tête côté Redon et à l'aide des dispositifs de basculement du portique de protection, vidées dans les bennes enlevées par la grue à tour située sur le terrain au-dessus du tunnel mis à la disposition de l'entreprise pour l'installation de ses bureaux et ateliers;
- une clôture limitative de 0,90 m de hauteur sous le tunnel et sur 100 m aux têtes pour délimiter le chantier de part et d'autre de la voie du T.C.T. (fig. 10).

3.2.2. Organisation du chantier et chronologie des travaux

Les travaux ont été exécutés en travaillant sans interruption en trois postes du lundi 4 h 15 au samedi 4 h 15. Pour ce qui concerne les travaux principaux, ils se répartissaient sur cinq chantiers élémentaires (fig. 11) :

Chantier 1. Mise sur cintres et investigations.

Ce chantier disposait du portique mobile n° 1 automoteur qui permettait d'exécuter à l'avancement avant le chantier n° 2, l'ouverture de fenêtres, en clé, dans la voûte, entre deux cintres provisoires. Par ces fenêtres, le géologue de l'entreprise effectuait la reconnaissance du terrain en vue de réunir, à l'avance, un maximum d'informations exploitables par le

Fig. 11. — Tunnel des Corbinières

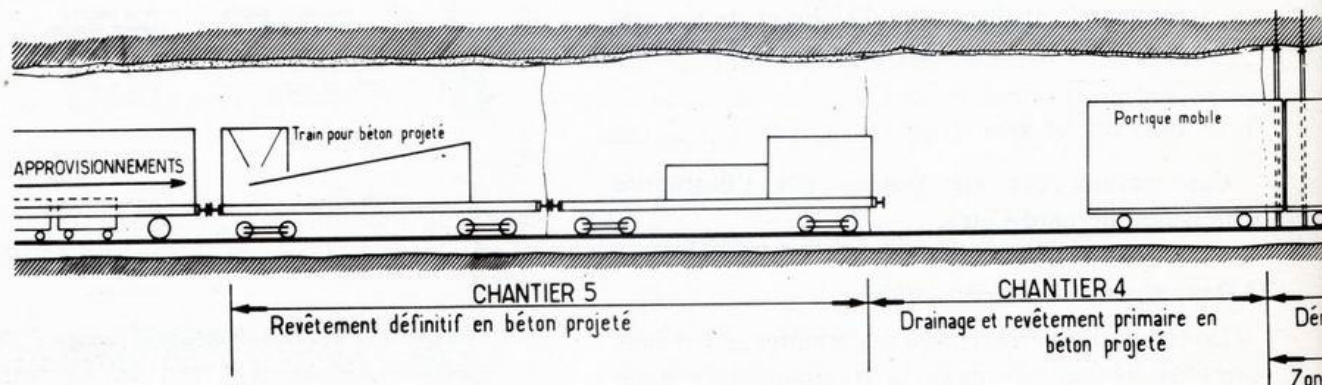




Fig. 12. — Tunnel des Corbinières : pose des cintres métalliques Launay.

(Cl. Baranger.)

chantier suivant, pour ce qui concerne notamment les mesures de sécurité et les dispositifs de confortement à envisager lors de la démolition de la voûte et de la purge du terrain.

Chantier 2. Démolition et boulonnage en voûte

Le portique mobile n° 2 automoteur était spécialement aménagé pour l'exécution de ces travaux. La démolition de la voûte était prévue à l'avancement par

tranches de 2,00 m maximum de tunnel. L'attaque d'une nouvelle tranche « n » de démolition n'était autorisée qu'après achèvement et stabilisation de la tranche $n-1$ précédente par les cintres légers type Launay entièrement boulonnés et après mise en place des boulons intermédiaires (entre cintres) de la tranche $n-2$.

La démolition de la voûte jusqu'aux naissances était exécutée, celle-ci reposant sur les cintres « standard »

coupe longitudinale du tunnel.

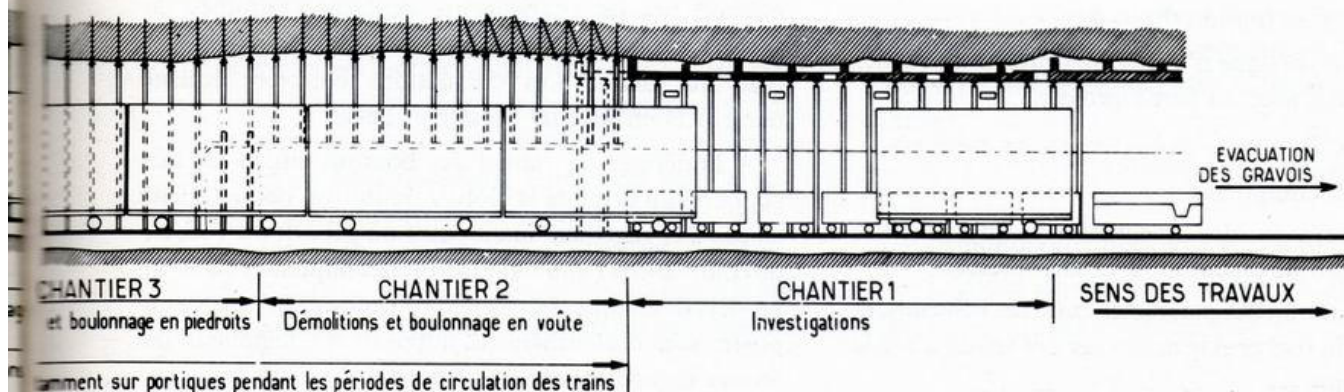




Fig. 13. — Tunnel des Corbinières :
pose des gaines de drainage souples CPV type Aliva.

par mesure de sécurité. Le marinage se faisait par gravité. Une fois la voûte démolie, les cintres provisoires étaient déposés à l'aide de vérins fixés au portique, puis stockés en attente de transfert sur le portique « Investigations ». On procédait ensuite à la purge et au déroctage du terrain afin d'obtenir le gabarit désiré ou l'adoucissement du profil transversal pour la mise en place des cintres Launay (fig. 12).

Puis les cintres légers précintrés en usine, ou sur place à la demande étaient posés tous les mètres et cloués au rocher par l'intermédiaire de six à huit boulons acier \varnothing 20 de 1,50 m de longueur scellés à la résine.

Le boulonnage du terrain était réalisé entre cintres par la mise en œuvre de tiges en fibre de verre de 2 m de longueur scellées à la résine, à raison de 0,5 unité environ au mètre carré. Elles étaient orientées en tenant compte de la fracturation du rocher.

A partir du portique n° 3 les hors-profils du rocher étaient comblés avec du béton projeté.

Chantier 3. Déroctage et boulonnage en piédroits

Ce chantier comprenait :

- le déroctage des piédroits jusqu'à 0,20 m minimum de distance du gabarit prescrit;
- la démolition des maçonneries (le cas échéant), la purge du rocher et le nettoyage des veines d'argile apparentes;

- la mise en œuvre tous les mètres, de cintres Launay, leur boulonnage au terrain à raison de deux boulons acier \varnothing 20 de 1,50 m scellés à la résine, par pied de cintre;
- la pose entre les cintres de deux boulons de fibre de verre;
- le comblement des hors-profils existants avec du béton projeté jusqu'au nu de l'extrados des cintres.

Effectué à l'avancement par tranches de 2,00 m de longueur, il devait suivre le chantier n° 2 d'aussi près que possible.

Chantier 4. Drainage et revêtement primaire en béton projeté

Les opérations suivantes étaient effectuées à partir des portiques n° 5 et 6, ce dernier étant automoteur :

- drainage constitué par des gaines en CPV souple type « Aliva » posées entre les cintres Launay depuis la voûte jusqu'aux barbacanes réservées à la base des piédroits et complété de trous d'appel forés tous les 2 m le long de ces gaines (fig. 13);
- première couche de béton projeté de 6 cm d'épaisseur;
- pose sur l'intrados des cintres Launay, d'un treillis soudé fixé au terrain par des épinglages en acier \varnothing 20 de 0,60 m de longueur, scellés à la résine à raison de trois unités au mètre carré.

Chantier 5. Revêtement définitif en béton projeté

Ce chantier concernait la mise en œuvre de deux couches de béton projeté d'épaisseur nominale de 7 cm, exécutées à l'avancement, par tranches successives d'assez grande longueur, à partir de la centrale à béton du train-travaux pendant l'intervalle de nuit (0 h 15-4 h 15) (fig. 14).

3.2.3. Sécurité du chantier

La circulation des trains se faisant sous le tunnel à l'abri de portiques roulants enjambant la voie du tronçon commun temporaire, la protection de ceux-ci contre les engagements de gabarit était assurée par deux « détecteurs de chargements déplacés » équipés de rayons infrarouges situés à 12 km environ de chaque côté du tunnel. Les circulations détectées étaient contrôlées en gare de Messac et Besle.

A l'intérieur du tunnel des boutons situés sur des supports au droit de la clôture limitative, permettaient en cas d'engagement intempestif du gabarit du T.C.T., de commander l'allumage de torches implantées à 50 m au-delà de chaque tête. Cette protection était répétée au poste; son déclenchement imposait à l'aiguilleur de fermer immédiatement ses signaux.



Fig. 14. — Le train travaux dans le tunnel des Corbinières.

(Cl. Baranger.)

La protection du personnel était assurée par un protecteur à chaque tête et deux protecteurs par front d'attaque sous le tunnel, dont un assurant plus particulièrement l'accompagnement des trains de berlines et surveillant le déplacement des portiques roulants.

Par ailleurs en vue d'assurer la sécurité des voyageurs à la traversée de ce chantier il avait été prévu :

- des annonces par haut-parleur et des affichettes apposées dans toutes les gares entre Rennes et Redon;
- deux portiques à lames de caoutchouc souple, placés à 50 m devant chaque tête de tunnel, matérialisant le gabarit des portiques mobiles.

4. Difficultés rencontrées et enseignements tirés du chantier

Au fur et à mesure de la démolition de la voûte en brique, des difficultés sont apparues, dues :

- à la géométrie très irrégulière du rocher. Il en résultait que pour la mise en place des cintres, bien que ces cintres soient spécialement étudiés pour permettre une certaine adaptation au terrain, une régularisation partielle de la voûte rocheuse était nécessaire entraînant des déroctages plus importants que prévu;
- au faible pourcentage de rocher altéré en surface ce qui, dans le poste « purge de rocher altéré-déroctage » accroissait la proportion de déroctage de rocher sain.

Les conséquences pour l'entreprise étaient une forte réduction de cadence du chantier élémentaire de déroctage qui entraînait une perte de rendement des tâches élémentaires suivantes : pose de cintres, boulonnage de roche, drainage et béton projeté.

Malgré le renforcement des moyens, apportés par l'entreprise, au chantier élémentaire de déroctage, les cadences moyennes sont restées de l'ordre de 1,50 m/jour, les cadences maximales ne dépassant pas 2 à 2,30 m/jour.

Par ailleurs, le marché prévoyait une méthode de traitement homogène sur toute la longueur du souterrain. Or, il est apparu au cours du chantier, que le terrain présentait dans certaines zones, des altérations qui ne permettaient pas d'employer, en toute sécurité, les dispositions techniques du marché et particulièrement le boulonnage.

Un traitement spécial consistant à mettre en œuvre des anneaux porteurs de 50 cm d'épaisseur après abattage de la maçonnerie et du terrain encaissant, en ayant recours à la méthode d'enfilage classique, a dû être adopté sur une centaine de mètres du tunnel, ce qui a perturbé encore un peu plus la bonne marche de ce chantier.

En définitive ces travaux qui ont entraîné entre autres la mise en œuvre de :

- démolition de maçonneries : 2 163 m³;
- purge et déroctage de rocher : 5 205 m³;
- béton projeté : 5 200 m³;
- cintres Launay : 272 t;

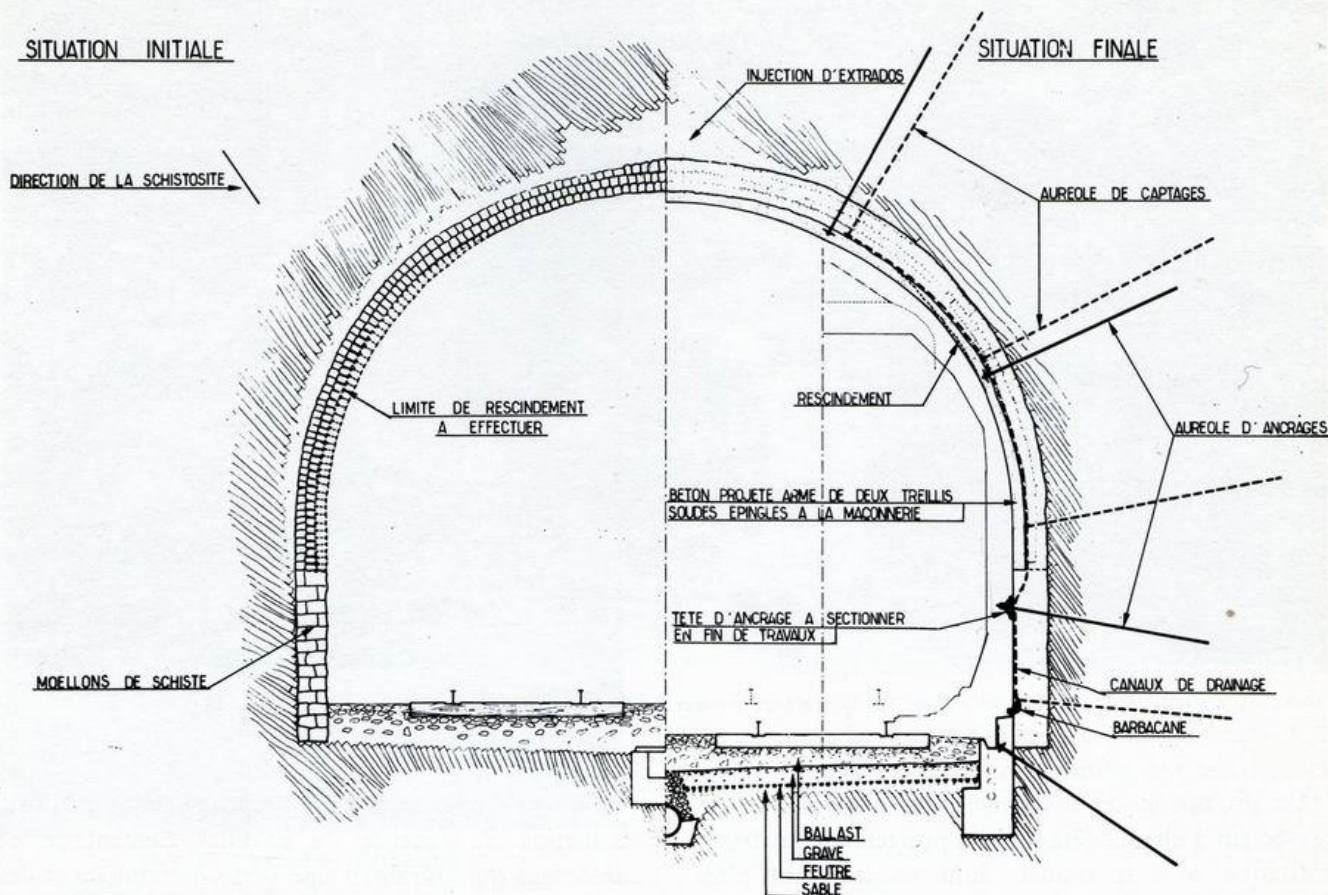


Fig. 15. — Coupe du tunnel de Saint-Elme.

- treillis soudé : 54 t;
- gaines de drainage Aliva : 10 000 m;
- ancrages acier ou fibres de verre : 40 570 m;
- forages d'appel : 4 320 m,

se sont révélés plus difficiles que prévu.

On a vu plus haut que le projet établi par la S.N.C.F. supposait une altération importante du rocher en surface et qu'en fait ce rocher s'est révélé plus sain que prévu sur plus de 500 m et par contre si dégradé sur une centaine de mètres que l'Entreprise l'a alors considéré comme « non boulonnable ».

Malgré toutes les précautions prises avant les travaux (sondages préalables, étude géologique, essais de démolition et de foration dans les grès et les schistes), malgré les dispositions du projet qui prévoyait des investigations en avant du chantier (présence obligatoire d'un géologue de l'Entreprise et ouverture de fenêtres) ce chantier a montré combien il est difficile d'apprécier à l'avance l'état de dégradation d'un terrain masqué par un revêtement existant, et de définir un mode de confortement adapté, répondant à tous les aléas de chantier, en vue d'éviter un contentieux avec l'Entrepreneur.

IV.3. Confortement d'un tunnel en briques: le tunnel de Saint-Elme

1. Site du tunnel

Le tunnel de Saint-Elme de 840 m de longueur est situé sur la ligne de Narbonne à Port-Bou entre les gares de Collioure et Port-Vendres.

Son revêtement est constitué sur près de 800 m en voûte par une maçonnerie de brique de 45 cm d'épaisseur et en piédroits sur une hauteur variable par une maçonnerie de moellons de schistes grossièrement assisés (fig. 15).

2. Problèmes posés. Choix de la solution

Dans le cadre de l'électrification de la ligne et en vue de dégager le nouveau gabarit imposé, il était nécessaire d'abaisser le niveau de la plate-forme et de reprendre en sous-œuvre les piédroits.

Le parement en brique étant de manière générale en très mauvais état et le déjointement des briques très

important, notamment dans les zones humides, la réfection de la voûte devait s'inscrire aussi dans le cadre des travaux de remise en état et d'amélioration du gabarit. La mise en place d'une coque en béton projeté se substituant aux briques dégradées en surface, permettant de compenser également un rescindement mesuré propre à améliorer le débouché (et à réduire d'autant l'abaissement des voies imposé pour l'obtention du nouveau gabarit) s'est donc imposée ici comme étant la solution la plus adaptée et la plus économique.

3. Travaux

3.1. TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Ils concernent les travaux de voie et de signalisation pour la mise en place d'un tronçon commun temporaire (T.C.T.) alternativement sur V 1 et sur V 2 avec limitation de la vitesse de circulation des trains à 30 km/h.

3.2. ENSEMBLE DES TRAVAUX PROJETÉS

Ces travaux confiés à l'Entreprise Quillery ont été exécutés en trois postes de 8 heures, avec une coupe simultanée des circulations sur les deux voies de 1 h 50 mn environ, de nuit, en vue de réaliser certains travaux en clé.

L'ensemble de ces travaux comprenait :

- des rejointoiements;
- des injections d'extrados et de remplissage;
- l'ancrage du revêtement au terrain encaissant;
- le rescindement et la mise en état de recette du parement de la voûte et d'une partie des piédroits pour la réalisation d'une coque en béton projeté;
- une coque en béton projeté dans les zones rescindées, en voûte et en piédroits;
- le confortement des piédroits par une longrine en béton armé;
- la création de 31 niches avec chambre de tirage, l'agrandissement et l'approfondissement des 32 niches existantes;
- des travaux de captage et d'assainissement en voûte et en base de piédroits, et la mise en place de gaines de câbles;
- des travaux de voies liés à l'abaissement du niveau des voies;
- l'abaissement de la plate-forme et la mise en place d'un assainissement souple avec drain central dans le tunnel, l'approfondissement des fossés, l'abaissement des voies à l'extérieur sur 250 m côté Collioure et sur 170 m côté Port-Vendres.

Nous ne traiterons ici que de la réfection du revêtement en voûte et piédroits, en notant que dans une zone de tunnel particulièrement dégradée (PM 220 à 240), il y avait déjà en place des cintres standard espacés de 1,25 m et que cette partie d'ouvrage devait être confortée en suivant un processus particulier dont nous parlerons plus loin.

3.3. CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

3.3.1. Zones courantes

L'étude géométrique ayant mis en évidence la nécessité de rescinder le revêtement existant sur une épaisseur variant de 20 à 25 cm environ à 0, en allant des reins à la clé, il convenait de consolider préalablement le revêtement. En l'absence de cintres, ce rôle devait être joué à la fois par les injections et par les ancrages.

Il a donc été prévu avant tout travail de rescindement :

- des injections d'extrados et de remplissage, les forages étant disposés en auréoles de huit trous tous les 2,50 m;
- huit ancrages en acier HA \varnothing 25 de 3,00 m de longueur disposés également en auréoles tous les 2,50 m.

Ces boulons ont été munis d'une plaque 300 x 300 x 20 calée au mortier sur le revêtement existant.

Après ces travaux de confortement provisoire, les travaux suivants ont été faits par plots alternés de 2,50 m :

- rescindements de la maçonnerie;
- captages d'eau et drainage en voûte (auréoles de forages \varnothing 78);
- épingleages (quatre épingles doubles au mètre carré);
- pose du premier lit de treillis soudé;
- projection de la première couche de béton projeté de 6 cm d'épaisseur.

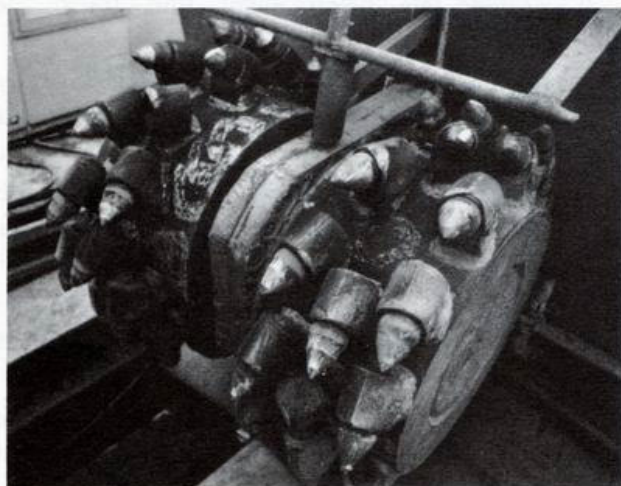
Par la suite, on a exécuté en continu, les travaux ci-dessous :

- pose du deuxième lit de treillis soudé;
- projection de la deuxième couche de béton projeté de 7 cm d'épaisseur;
- mise en place de barbacanes.

Les travaux de rescindement confiés par l'Entreprise Quillery, à son sous-traitant Solétanche ont été exécutés à l'aide d'une fraise, au bout d'un bras télescopique monté sur wagon (fig. 16 et 17).



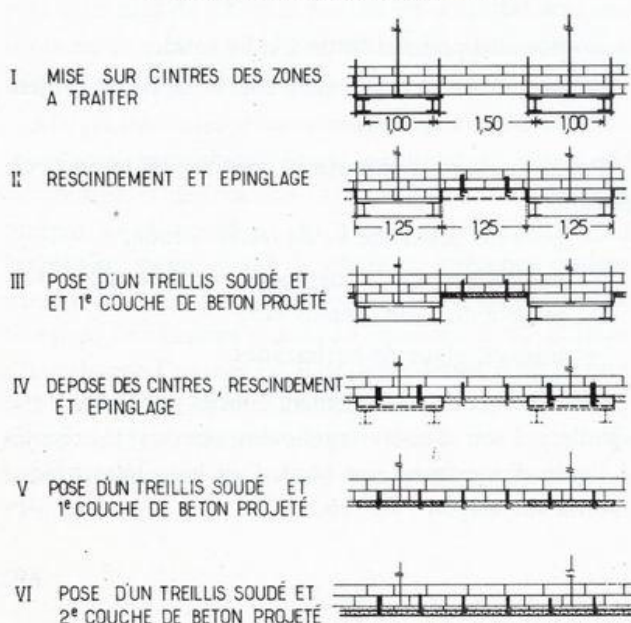
Fig. 16. — Tunnel de Saint-Elme : rescindement de la voûte à l'aide de la fraise sur bras télescopique.



(Cl. S.N.C.F. C.A.V.)

Fig. 17. — Tête de la fraise de rescindement.

Fig. 18. — Tunnel de Saint-Elme : les phases de travaux en zones délicates.



3.3.2. Zones déjà mises sur cintres

Dans cette zone où la stabilité était déjà assurée par des cintres, les travaux de rescindements et de béton projeté ont été exécutés par plots alternés de 1,25 m seulement comme indiqué sur la figure 18.

On notera que ces cintres provisoires n'ont été déposés qu'après réalisation d'un anneau sur deux de la première couche de béton projeté capable d'assurer le confortement du revêtement rescindé dans la phase ultérieure.

Ces travaux de rescindement, de boulonnage et de béton projeté n'ont pas donné lieu à des problèmes particuliers mis à part les zones très humides du tunnel, où préalablement à la mise en place du béton projeté on a du procéder à des traitements de ces surfaces ruisselantes.

Ces divers procédés étaient tout d'abord précédés d'un ensemble de captages et de drainages en vue d'étancher au mieux la surface à traiter, puis :

- dans les cas d'humidité diffuse constante due à la percolation de l'eau par les joints de briques, on a pu se contenter d'une gunité au ciment Prompt de 1 cm (avec mortier pré-préparé Bat-Express);
- dans les zones de venues d'eau diffuses plus importantes, on a tout d'abord obturé les fissures avec le produit Ombran W, et on a complété l'étanchement par l'application d'une barbotine Ombran B.

Ces divers traitements appliqués sur environ 1 000 m² du tunnel ont donné d'excellents résultats et ont permis de réaliser par la suite sans trop de difficultés la projection des couches de béton projeté.

Comme on le voit par cet exemple du confortement du tunnel de Saint-Elme le béton projeté et le boulonnage peuvent apporter une solution souple et efficace à la remise en état des revêtements dégradés. On a vu également que la mise en place d'une coque en béton projeté après rescindement localisé des maçonneries pouvait se réaliser moyennant un confortement préalable, sans diminution du coefficient de sécurité vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage.

Pour toutes ces raisons le confortement des tunnels de la S.N.C.F. par béton projeté, qui est une solution économique, s'impose très souvent et plus particulièrement chaque fois que l'état de dégradation ou les déformations du tunnel ne nécessitent pas un traitement de surface plus lourd (voussoir-fonte par exemple) ou une reconstruction partielle (ou totale).

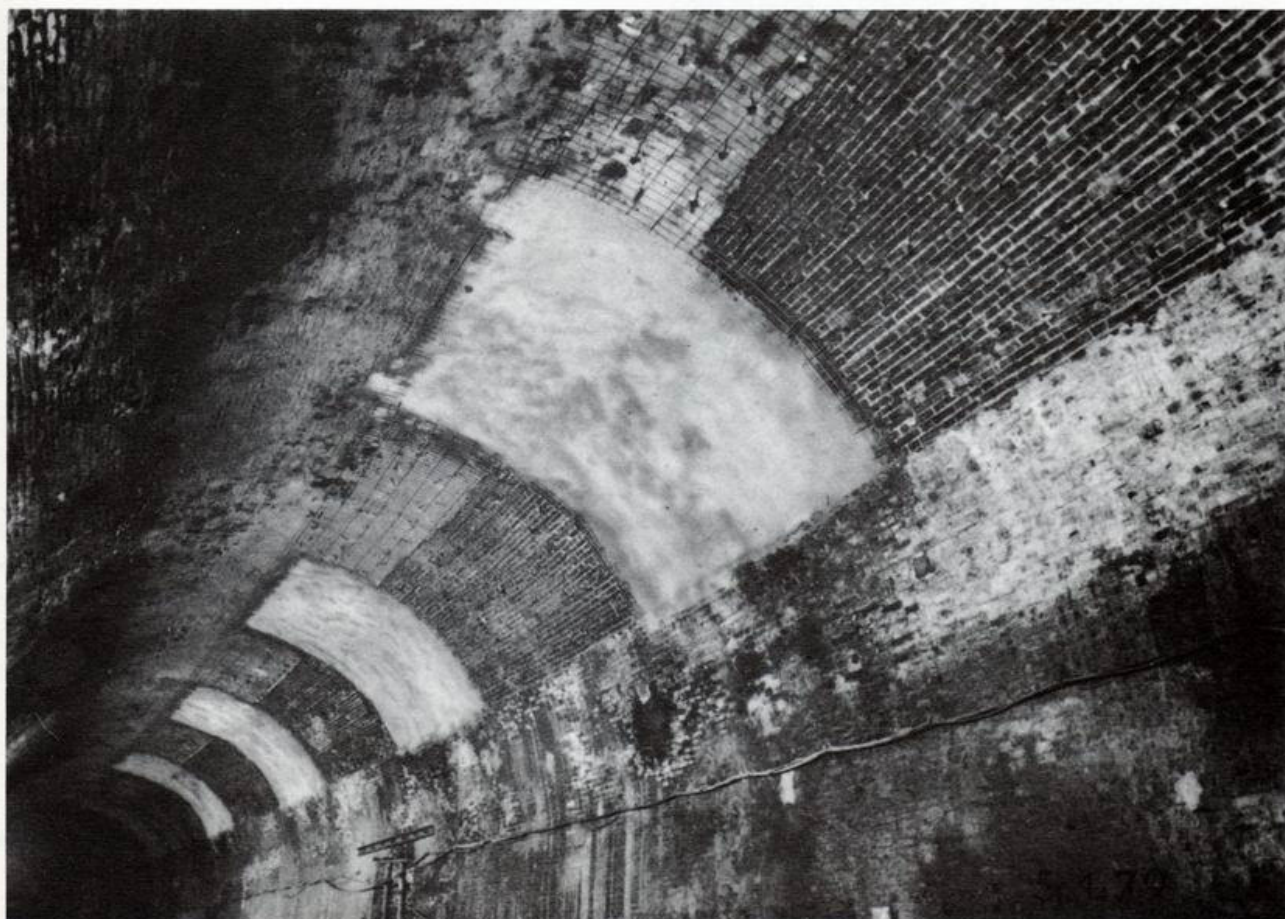
Parmi les chantiers récents de remise en état des tunnels ferroviaires on peut notamment citer :



Fig. 19. — Tunnel de Belleville : remise en état des voûtes sous pose préalable de cintres.

(Cl. Baranger.)

Fig. 20. — Tunnel de Perternère : travail par plots alternés.



(Cl. photo +.)



(Cl. Photo +)

Fig. 21. — Tunnel de Perternère : achèvement de la nouvelle voûte en béton projeté.

- avec pose de cintres préalable, les tunnels de Lutzelbourg (Région de Strasbourg), de Pissy-Poville et de Beauvoisine (région de Rouen), des Saumes (Région de Marseille) de Las Elmes et de Villeneuve-lès-Avignon (Région de Montpellier);
- sans pose de cintres préalable, les tunnels de Charonne et de Belleville (Région de Paris-Nord), avec

voie unique dans l'axe (fig. 19), les tunnels de Perternère ⁽¹¹⁾ Croix-de-Force, Peyrefitte (Région de Montpellier), de Criel et de Vières (Région de Chambéry).

⁽¹¹⁾ Pour ce tunnel ou les rescindements étaient superficiels et n'intéressaient qu'une partie de la voûte, on a travaillé par plots alternés de 5,00 m de longueur (fig. 20 et 21).