

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
DIRECTION DES ROUTES

Guide du béton coffré en tunnel



CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS

Source: www.almohandiss.com

MINISTERE DES TRANSPORTS
DIRECTION DES ROUTES

Guide du béton coffré en tunnel

Juin 1983



CENTRE D'ETUDES DES TUNNELS
109, avenue Salvador Allendé - B.P. 48 -
69672 BRON CEDEX - Tél.(7) 841-81-25

Le guide du béton coffré en tunnel a été rédigé par un groupe de travail, sous la présidence de :

Monsieur Jean PERA, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées,
Directeur du C.E.Tu.

Ont participé à ce groupe de travail :

MM. B. BUTTION, C.E.T.E. de Lyon
B. CONSTANTIN, C.E.Tu
J. COSTES, E.D.F.
P. HINGANT, SCETAUROUTE
C. LEECH, puis C. MADIER, S.G.E. - T.P.I.
M. LEGRAND, C.E.Tu
G. LELARDEUX, AREA
R. LESAGE, L.C.P.C.
J.P. LOUBIGNAC, Entreprise HUILLET
J.L. REITH, C.E.Tu
C. TRUFANDIER, S.N.C.F.

Pour la partie relative aux coffrages, le groupe s'est assuré la collaboration de :

MM. M. MAROTINE, C.F. BLAW-KNOX
M. MELKONIAN, CERCOMAT

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation du Directeur du Centre d'Etudes des Tunnels (ou de ses représentants autorisés).

© 1983 - C.E.Tu.

ISBN 2-11-084723-9

SOMMAIRE

	Pages
PREAMBULE	5
CHAPITRE 1 – LE REVETEMENT DEFINITIF DES TUNNELS	7
1.1. Nature du revêtement	7
1.2. Rôle du revêtement	9
1.3. Conception du revêtement	11
1.4. Mise en œuvre du revêtement	16
1.5. Réception du revêtement	16
1.6. Surveillance - Entretien - Réparations	17
1.7. Qualités essentielles d'un béton en souterrain	17
1.8. Conclusion	19
CHAPITRE 2 – NATURE ET QUALITE DES CONSTITUANTS DU BETON	21
2.1. Ciments	21
2.2. Adjuvants	25
2.3. Eau de gâchage	27
2.4. Granulats	27
CHAPITRE 3 – SPECIFICATIONS DES BETONS EPREUVES D'ETUDE, DE CONVENANCE ET DE CONTROLE	33
3.1. Spécifications des bétons	33
3.2. Epreuve d'étude	35
3.3. Epreuve de convenance	38
3.4. Epreuve de contrôle	39
3.5. Epreuve d'information	41
CHAPITRE 4 – LE MATERIEL DE BETONNAGE	43
4.1. La fabrication du béton	43
4.2. Le transport du béton	44
4.3. Le coffrage	46
4.4. La vibration	55
CHAPITRE 5 – LE REVETEMENT ET L'ETANCHEMENT	57
5.1. Etanchement par le revêtement coffré	57
5.2. Prédrainage	59
5.3. Etanchéité extradados	59
5.4. Etanchéité intrados	61
5.5. Autres modes d'étanchement	61

CHAPITRE 6 — LA PRATIQUE DU BETONNAGE	63
6.1. Programme du bétonnage	63
6.2. Avant le bétonnage	64
6.3. En cours de bétonnage	65
6.4. Après le bétonnage	66
6.5. Sécurité	69
CHAPITRE 7 — SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DU REVETEMENT	71
CONCLUSION	75
ANNEXE	76
BIBLIOGRAPHIE	79
LISTE DES ILLUSTRATIONS	82

PREAMBULE

Le Centre d'Etudes des Tunnels du Ministère des Transports a publié en 1976 une première version du Guide du béton coffré en tunnels routiers. On y faisait alors le constat d'une grande divergence sur les qualités demandées à ce béton et, d'une manière générale, d'une moindre attention dans la mise en place due au fait que les problèmes qui paraissaient importants pour le souterrain étaient ceux du creusement. La réalisation du béton de revêtement était alors considérée comme un problème de technicité courante.

Depuis cette date, grâce à l'importance des ouvrages réalisés, aux constatations systématiques effectuées en cours de chantier et grâce au souci des maîtres d'ouvrage de disposer de tunnels ou de galeries faciles à exploiter et vieillissant bien, on a pu observer une meilleure prise en compte des différents paramètres qui influencent la qualité du revêtement, son étanchement et donc sa durabilité. On a ainsi esquissé peu à peu une méthodologie pour l'étude et la réalisation du revêtement définitif des tunnels. Et les résultats ont suivi. Des exemples de tunnels autoroutiers dont la réalisation des deux tubes a été décalée dans le temps, ont bien montré l'amélioration de la qualité.

Par ailleurs, depuis la première parution de ce guide, un certain nombre de textes a modifié le cadre technique et réglementaire dans lequel s'inscrit la réalisation des ouvrages en béton, qu'il s'agisse de la nature des constituants ou des contrôles de qualité. Par ailleurs, la nouvelle rédaction du Fascicule n° 69 « Travaux en souterrain » du C.C.T.G. et de ses annexes prend en compte l'évolution récente des méthodes de construction des tunnels.

Enfin, il est apparu à l'usage que la première version du guide, tout en étant très précise sur les études et les contrôles de bétons, ne faisait pas suffisamment ressortir les caractères spécifiques du bétonnage en souterrain au niveau du chantier. Certaines opérations propres aux tunnels (traitement des reprises de bétonnage, injections de remplissage...) n'étaient pas évoquées.

Il est donc apparu opportun de reprendre la rédaction de ce guide en tenant compte des différents éléments énoncés ci-dessus.

Il est évident que ce guide est destiné à faciliter au projeteur la mise au point de la solution du problème réel qui lui est posé mais qu'il ne constitue pas une directive. A chacun d'effectuer les études nécessaires en fonction des buts recherchés et en liaison étroite avec le laboratoire, l'entreprise et ses sous-traitants.

*
**

A l'origine, ce guide concernait le revêtement en béton coffré des **tunnels routiers**, domaine d'intervention privilégié du C.E.Tu.. Suite à la demande de certains maîtres d'œuvre, cette restriction a été supprimée. En effet, quelle que soit la destination de l'ouvrage, le problème de la réalisation du revêtement définitif se pose en général de la même manière. Certains cas particuliers doivent toutefois être étudiés de façon spécifique : galeries en charge, revêtement armé.

De la même façon, l'infrastructure intérieure éventuellement nécessaire pour l'exploitation de l'ouvrage (gaines de ventilation des tunnels routiers, par exemple) n'est pas concernée par le guide. Il s'agit de structures en béton armé, voire en béton précontraint dont les règles de construction s'apparentent à celles des ouvrages à l'air libre de même nature. Il y sera cependant fait allusion dans certaines parties de ce guide comme l'étude et le contrôle, pour lesquelles la méthodologie est identique quelle que soit la nature du béton.

Avertissement

Il a été tenu compte, autant que possible, des orientations de la nouvelle rédaction du Fascicule n° 65 « Exécutions des ouvrages et construction en béton armé » du C.C.T.G. Après publication de ce document, un complément au présent guide sera rédigé. Il comportera, en outre, des articles types pour C.C.T.P. de travaux en tunnel.

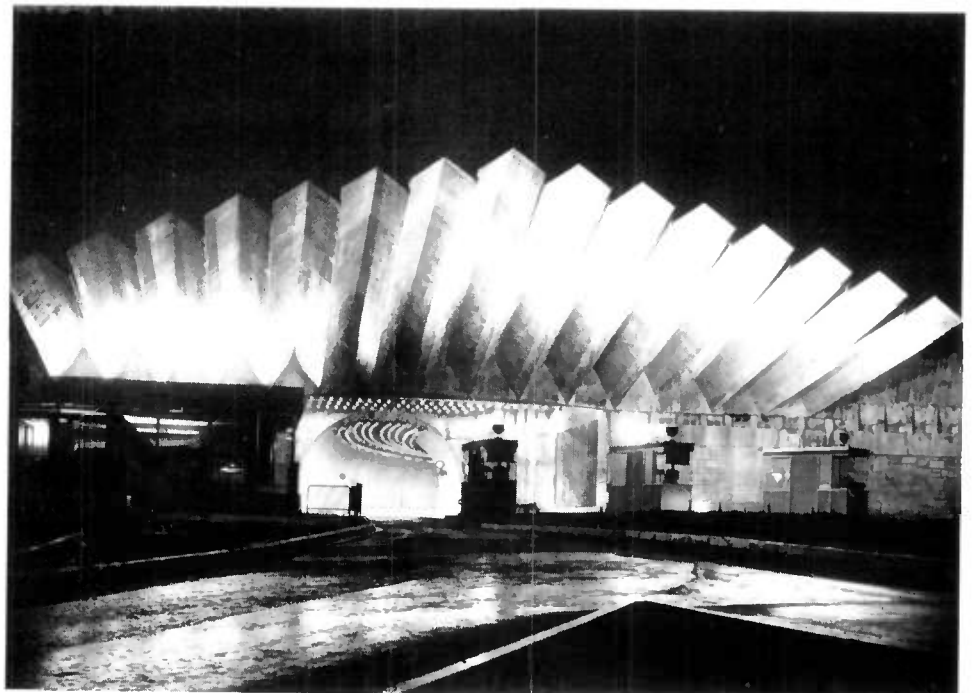


Figure 1. Tunnel sous le Mont-Blanc - Tête France.

CHAPITRE 1

LE REVETEMENT DEFINITIF DES TUNNELS

1.1. NATURE DU REVETEMENT

Le revêtement définitif des tunnels est réalisé, dans la grande majorité des cas en :

BETON COFFRE NON ARME

En effet, c'est souvent la meilleure solution technico-économique pour assurer la stabilité et l'exploitation des ouvrages. Si ce caractère particulier du béton en souterrain figure en tête du guide, c'est qu'il le distingue de façon fondamentale du béton des structures à l'air libre (bâtiment ou ouvrages d'art). Seul le béton de barrage présente également ce caractère mais dans un autre contexte.

Pour mémoire, on peut rappeler les autres types de revêtement et leur domaine d'emploi en soulignant qu'ils ne font pas l'objet du présent guide.

Les tunnels récents non revêtus sont très rares, surtout parmi les ouvrages destinés à recevoir du public (tunnels routiers, SNCF ou métros). Ils nécessitent un terrain encaissant en roche massive et non évolutive, sans eaux d'infiltration. En principe, il ne peut s'agir que d'ouvrages courts ne devant pas être ventilés artificiellement. En pratique, les tunnels récents non revêtus sont essentiellement des galeries hydrauliques à écoulement libre (galeries EDF).

Le revêtement définitif des tunnels en **béton projeté** est envisageable pour des ouvrages dont le dimensionnement n'impose pas des épaisseurs de béton supérieures à 15 ou 20 cm. Au-delà de ces valeurs, l'utilisation du béton projeté est actuellement moins économique que celle du béton coffré. Dans l'avenir, la mécanisation et l'amélioration du rendement de la projection peuvent modifier cette limite. D'autre part, dans le cas des tunnels routiers, l'emploi du béton projeté est limité aux tunnels non ventilés ou aux tunnels dont le système de ventilation est semi-transversal, le conduit de ventilation étant alors impérativement en béton coffré.

Les revêtements en **béton coffré armé** sont tout à fait exceptionnels en souterrain.

Cette solution est adoptée lorsque le revêtement est supposé reprendre une charge hydrostatique importante dans le cas d'un étanchement total de l'ouvrage. Le revêtement peut également être armé lorsque suite à des convergences trop importantes, son épaisseur est insuffisante pour assurer la stabilité de l'ouvrage à long terme.

Par ailleurs, certaines parties d'ouvrages, telles que les casquettes réalisées aux têtes à l'air libre ou les gaines de ventilation dans les tunnels routiers, sont en béton armé. Mais il s'agit de structures dont le mode de construction s'apparente aux ouvrages d'art à l'air libre.

Enfin, on peut être conduit à **armer localement le revêtement** dans des sections où des calculs font apparaître des contraintes de traction ou de cisaillement importantes. Ces sections, les plus sollicitées, se situent généralement en clé de voûte, en radier et à la liaison radier-piédroits.

L'utilisation de **voussoirs préfabriqués** en béton ou en fonte est plutôt réservée aux tunnels creusés au bouclier dont les applications, en France, sont actuellement peu nombreuses mais susceptibles de se développer.

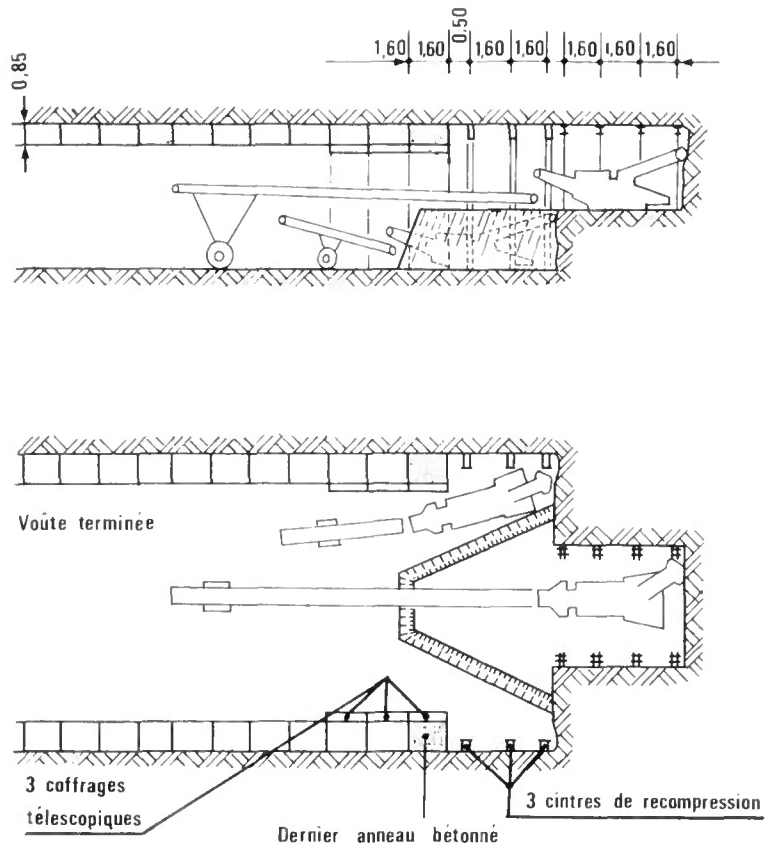


Figure n° 2. Autoroute A 13 - Tunnel de St-Cloud. Bétonnage à l'avancement en demi-section supérieure.

1.2. *ROLE DU REVETEMENT*

Lors de la conception du projet, on définit le rôle que sera amené à jouer le revêtement définitif du tunnel, d'une part vis-à-vis du terrain avoisinant (résistance aux charges transmises par le terrain et l'eau, protection contre les venues d'eau...) et d'autre part vis-à-vis tant de l'usager que du gestionnaire.

1.2.1. *Rôle de soutènement*

Suivant le cas, le rôle du revêtement en béton est le suivant :

— **Soutènement rapide du terrain encaissant**

Il s'agit des cas où le revêtement en béton est mis en place rapidement à l'avancement soit derrière un bouclier, soit lorsque le soutènement provisoire se révèle insuffisant malgré son importance. Cette méthode est également utilisée lorsqu'on souhaite récupérer les cintres de soutènement (figure 2).

Le revêtement doit alors être capable de reprendre la totalité des efforts transmis par le terrain. Cela peut conduire à des épaisseurs importantes de béton.

Enfin, il faut remarquer que le bétonnage à l'avancement est d'autant plus délicat à mettre en œuvre que plusieurs ateliers (creusement, soutènement, bétonnage, injections de remplissage) se trouvent réunis dans un espace très restreint. Il est donc nécessaire de planifier et d'organiser le plus précisément possible les différentes opérations. Sauf cas particuliers, ce mode de bétonnage est à éviter au niveau du projet. Il est plutôt réservé au passage d'accidents en cours de chantier et aux grandes sections.

— **Soutènement d'une cavité stable à moyen terme, par elle-même ou grâce à un soutènement provisoire**

Dans ce cas, on a affaire soit à une cavité stable à l'excavation mais dont le terrain avoisinant est susceptible de décompression lente ou de détérioration à long terme, soit à une cavité stable grâce à un soutènement susceptible d'encaisser par lui-même les efforts et les déformations induites par le terrain avoisinant à court et à moyen terme.

Par les méthodes modernes de construction de tunnels, telle la Nouvelle Méthode Autrichienne, on cherche à obtenir un nouvel état d'équilibre par le soutènement provisoire (ou anneau externe). Le rôle du revêtement en béton coffré (ou anneau interne) est d'assurer la stabilité de l'ouvrage à long terme. On peut alors tenir compte de la participation du soutènement provisoire dans la mesure où sa durabilité est assurée (ancrages scellés sur toute leur longueur, béton projeté).

Toutefois, en cas de chargement différé ou de terrains gonflants, l'état d'équilibre peut n'être atteint qu'après un délai important incompatible en général avec le planning du chantier (plusieurs mois ou même plusieurs années). Le revêtement doit donc être dimensionné en conséquence.

Le bétonnage est réalisé indépendamment des ateliers de creusement.

1.2.2. *Rôle d'étanchement*

Lorsque cela est nécessaire, le revêtement des tunnels est conduit à assurer l'étanchement de l'ouvrage par lui-même ou comme support des différents types d'étanchéité.

L'écoulement de l'eau à travers le revêtement et à l'intérieur de l'espace libre est néfaste dans tous les cas.

Tout d'abord, l'étanchement préalable des ouvrages par drainage et captage des eaux avant mise en place du revêtement est essentiel pour limiter l'action des eaux pendant la prise et le durcissement du béton. Des venues d'eau diffuses même minimales peuvent doubler la quantité d'eau dans le béton frais (voir tableau n° 1), ce qui modifie de façon importante la qualité finale du revêtement.

Selon sa nature chimique, cette eau peut mettre en cause la durabilité du béton. Il y a donc lieu d'apporter un soin particulier au choix des composants du béton, surtout du ciment, et à la compacité du béton durci pour lui permettre de résister aux eaux agressives ; cette compacité doit également être recherchée pour permettre la résistance du

Exemple de l'influence des venues d'eau provenant du terrain au cours du bétonnage sur les caractéristiques du béton frais :

- revêtement de tunnel routier à 2 voies
- coffrage de 10 m de longueur
- volume de béton au mètre linéaire : 12 m³

(soit 0,45 m d'épaisseur moyenne environ)

- volume total de béton : 120 m³
- **volume d'eau dans le béton frais** (170 l/m³)
20 400 l

- venues d'eau diffuses totalisant 1 l/s sur toute la surface de l'anneau soit 250 m² environ
- durée du bétonnage : 6 heures (20 m³/h)
- **volume d'eau provenant du terrain**
21 600 l

ce qui revient à doubler la quantité d'eau dans le béton frais.

Tableau n° 1. Influence des venues d'eau sur le béton frais.

revêtement au gel. En effet, pour les tunnels en altitude, au moins au voisinage des têtes et dans les galeries d'amenée d'air frais, on peut craindre des dégâts dus au gel et même la formation de stalactites dont la chute peut mettre en cause la sécurité des usagers.

Par ailleurs, dans le cas des tunnels routiers, les venues d'eau à l'intérieur de l'espace de circulation conduisent à la salissure des piédroits, à la dégradation des installations électriques et des revêtements de chaussée.

Le rôle d'étanchement du revêtement, en relation avec les dispositifs de drainage et d'étanchéité, est essentiel.

1.2.3. *Rôle du revêtement pendant l'exploitation*

On a déjà vu les inconvénients apportés à l'exploitation lorsque le rôle d'étanchement n'est pas rempli convenablement.

Par ailleurs, les exigences de l'exploitation d'un tunnel routier en ce qui concerne la surface intérieure de l'ouvrage intéressent :

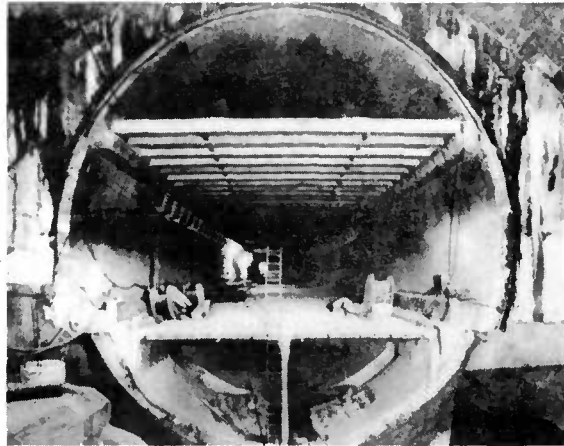
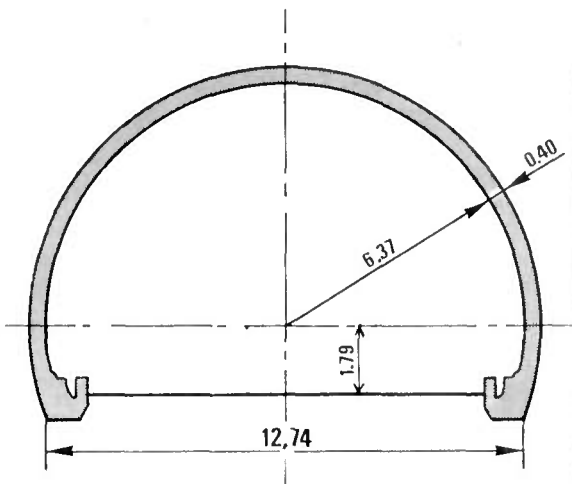
- son aspect et spécialement son coefficient de réflexion. Le rendement des installations d'éclairage est nettement amélioré par des parois claires et susceptibles de le rester ou d'être nettoyées par lavage.
- la rugosité ou les décrochements entre anneaux qui doivent rester dans les limites acceptables pour les pertes de charges aérodynamiques des circulations longitudinales d'air. L'incidence de la rugosité est importante lorsque le parement est utilisé pour une galerie de ventilation. Pour les tunnels longs, le surcoût d'énergie dû à une mauvaise qualité de surface peut être important.

Les défauts de surface augmentent également les pertes de charge dans les galeries hydrauliques.

Dans l'état actuel de la technique, un revêtement définitif en **béton projeté** ne peut remplir ces conditions de façon satisfaisante.

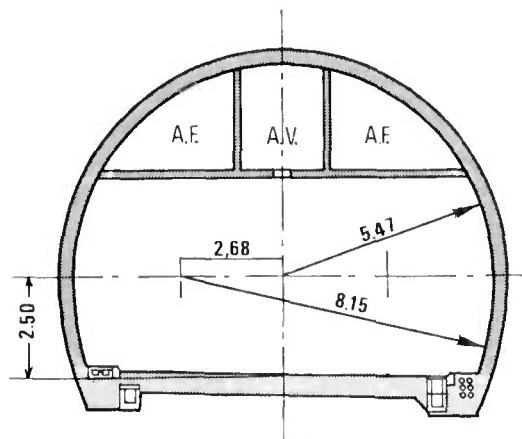
1.3. CONCEPTION DU REVETEMENT

Le revêtement des tunnels est constitué par un arc de béton dont l'intrados détermine l'espace disponible pour l'exploitation de l'ouvrage. En général, afin de respecter au mieux le principe de l'auto-soutènement géométrique, sa forme est déterminée par une courbe qui peut être : un cercle complet, un arc de cercle d'angle au centre supérieur à 180°, des arcs de cercle successifs avec tangentes communes aux points de raccordement, ou plus généralement une succession de courbes de courbure voisine (figure 3). On évite les formes surbaissées qui conduisent à une majoration des efforts de traction à l'intrados de la clé de voûte.

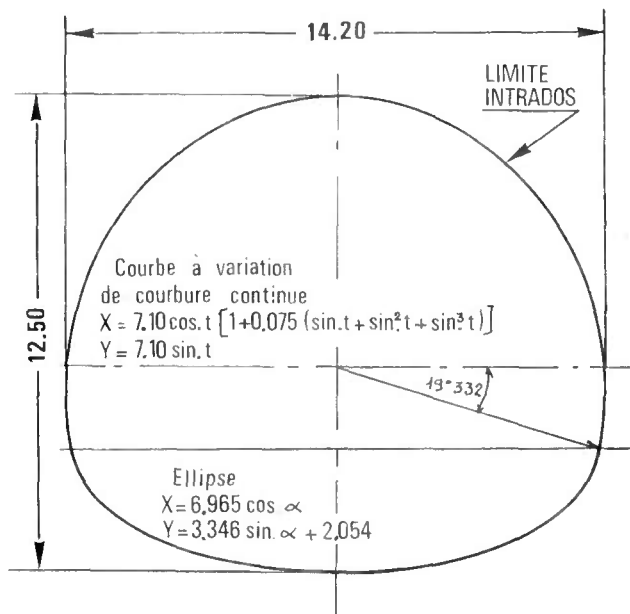


Autoroute A 8
Tunnels a 3 voies de circulation

Tunnel sous FOURVIERE



Tunnel de CHAMOISE



Tunnel de CIMIEZ

Figure n° 3. Définition géométrique de l'intrados de tunnels routiers

Cet arc peut être ouvert. Il repose alors de chaque côté à la base des piliers sur des appuis dont la dimension dépend des caractéristiques géotechniques du terrain encaissant. Ces appuis sont généralement conçus pour permettre le passage des canalisations ou chemins de câbles nécessaires à l'exploitation de l'ouvrage (figure 4).

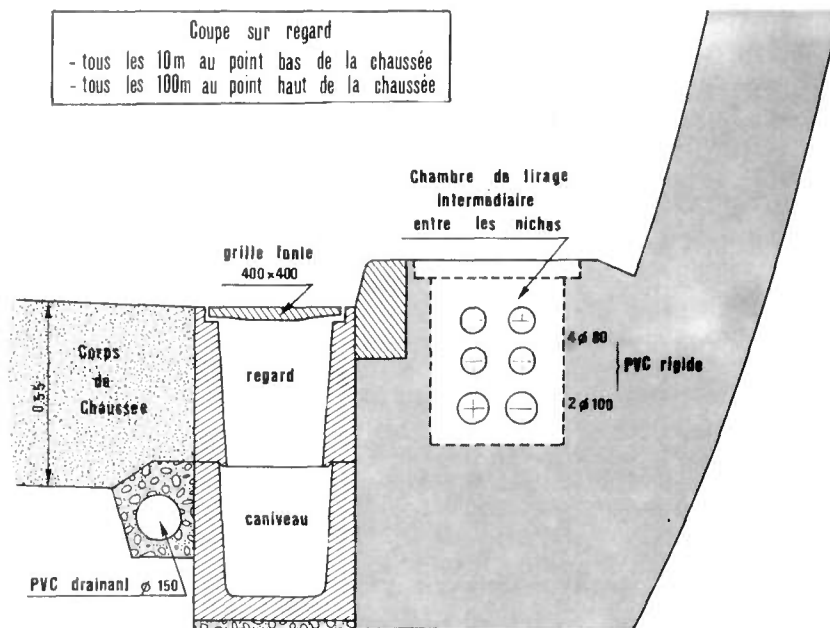


Figure n° 4. Autoroute A 40 - Tunnel de Chamoise. Aménagement type des banquettes

Lorsque la nature des terrains le nécessite, cet arc peut être fermé par un radier contrevoûté qui, en général, a un rayon supérieur à celui de la voûte. Si des efforts importants sont à reprendre, le raccordement entre voûte et radier et le radier lui-même peuvent être ferrailés (figure 5).

Selon le mode d'exécution choisi, le revêtement est réalisé en une ou plusieurs phases.

Si le revêtement est mis en œuvre en une seule phase, une opération préliminaire consiste à réaliser les appuis et les amorces de la voûte de façon à pouvoir caler le coffrage. Les plots ont une longueur comprise entre 5 et 12 m selon l'importance de l'ouvrage. Il y a donc un joint transversal à chaque reprise.

Le bétonnage en continu doit être envisagé avec de grandes précautions. Il nécessite un nombre de coffrages importants (d'une longueur cumulée de l'ordre de six fois le diamètre du tunnel) et des moyens de fabrication et de mise en place dont la fiabilité doit permettre un bétonnage de plusieurs jours, voire d'une semaine sans interruption.

Si le revêtement est mis en œuvre en deux phases, deux cas se présentent en général :

1. - La voûte est réalisée dans un premier temps en demi-section supérieure. les piliers et les appuis sont ensuite bétonnés par plots (figure 6). Il y a intérêt à armer la base de la retombée de la voûte afin d'améliorer les conditions de reprise en sous-œuvre par la création d'une liaison longitudinale entre anneaux.

2. - Les appuis et les pénédroits sont réalisés dans une première phase à partir de galeries d'avancement latérales. La voûte est ensuite bétonnée en demi-section supérieure (figure 7).

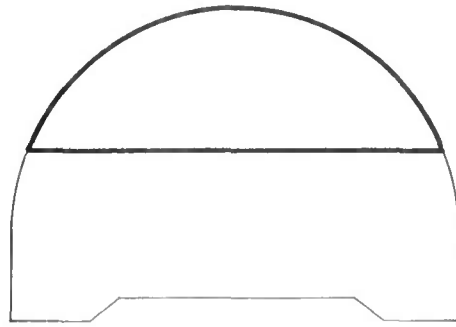


Figure n° 5. Autoroute A 8 - Tunnel du Col de Guerre. Ferrailage en cours de la contre-voûte et des pénédroits

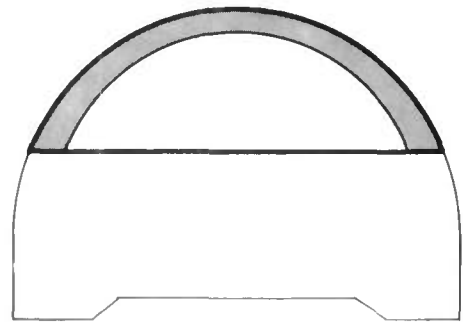
Dans les deux cas, la longueur usuelle des plots est de l'ordre de 5 m à cause des reprises en sous-œuvre. On a donc des reprises longitudinales au niveau du contact voûte-pénédroits et des reprises transversales entre plots. D'une manière générale, les reprises transversales entre plots de voûte et celles entre plots de pénédroits sont décalées. Si les conditions locales imposent une méthode de creusement par sections divisées et autant de phases de bétonnage, on retrouve à chaque fois les problèmes signalés ci-dessus : reprise en sous-œuvre, joints longitudinaux et joints transversaux qui constituent autant de points de faiblesse du revêtement.

Dans l'état actuel de nos connaissances, le dimensionnement du revêtement définitif des tunnels, c'est-à-dire la détermination de son épaisseur, ne résulte pas d'un calcul précis (sauf pour les tunnels sous faible couverture dans les sols) mais d'une approche semi-empirique qui prend en compte les conditions géotechniques et hydrogéologiques à long terme. L'épaisseur du revêtement en clé de voûte est comprise entre 0,30 et 1,00 m pour un tunnel routier ou ferroviaire. On considère que l'épaisseur minimale de 0,30 m est nécessaire pour assurer une bonne mise en place du béton. C'est actuellement, en principe, l'épaisseur du revêtement des galeries hydrauliques.

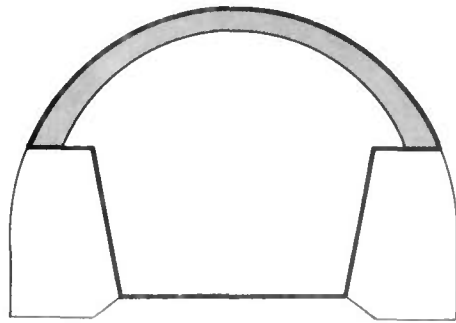
Pour les galeries de section inférieure à 10 m², une épaisseur de 0,15 m doit être considérée comme un minimum pour les mêmes raisons.



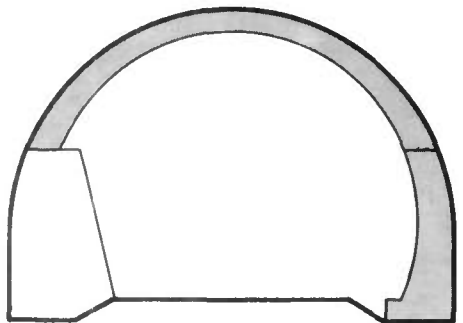
Abattage 1/2 section supérieure



Bétonnage de la voûte



Abattage du stross



Realisation des piedroits par plots alternés

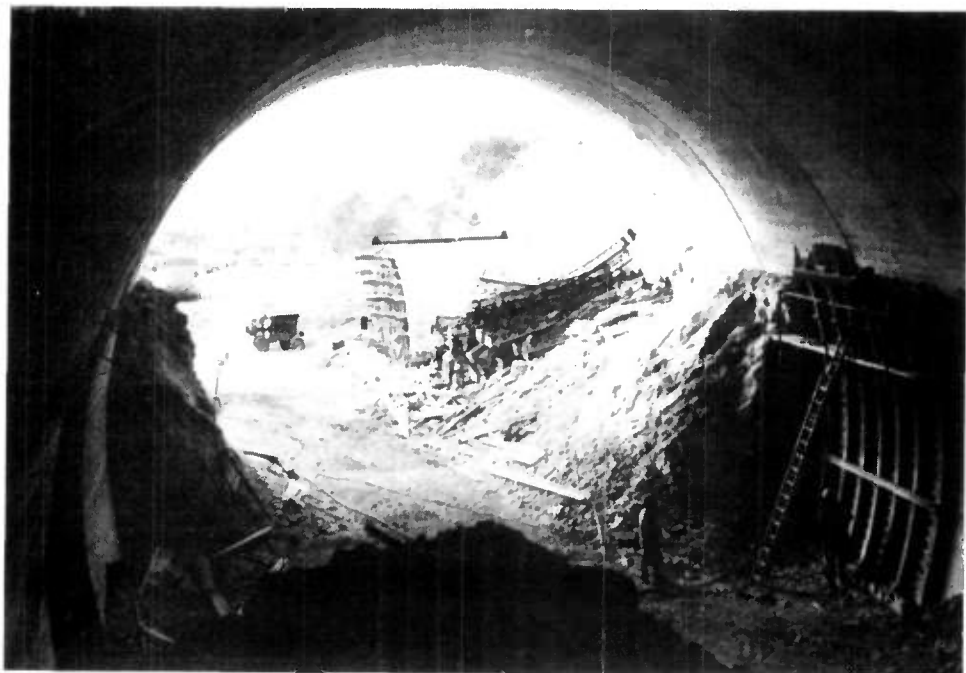
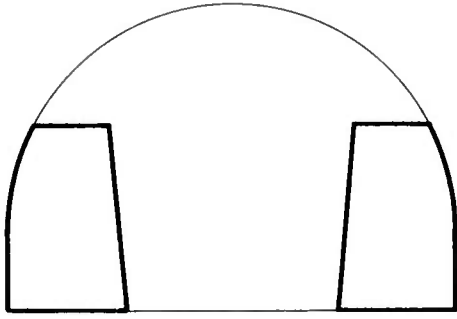
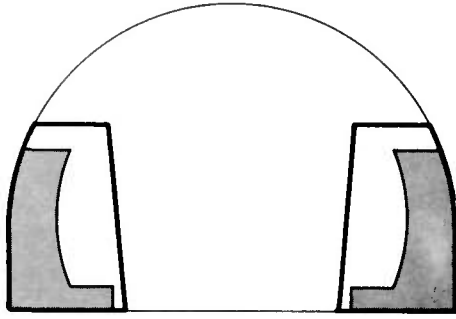


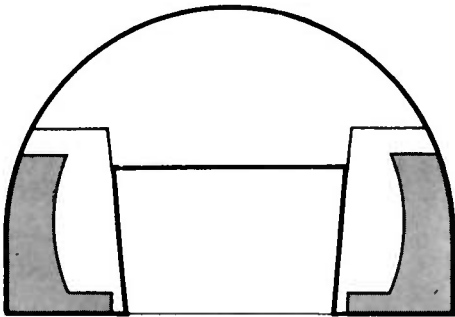
Figure n° 6. Autoroute A 8 - Tunnel de l'Angesse. Phases d'exécution dans le calcaire



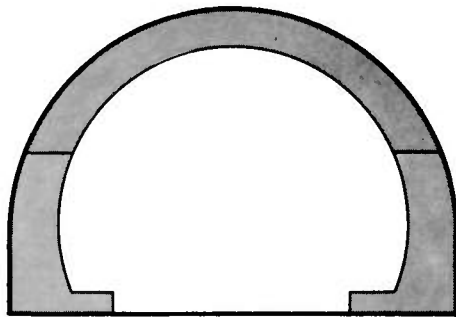
Excavation des galeries de pied



Bétonnage des piedroits



Excavation de la section supérieure



Bétonnage de la voûte puis terrassement du stross



Figure n° 7. Autoroute A 8 - Tunnel de l'Angesse. Phases d'exécution dans les marnes

1.4. MISE EN ŒUVRE DU REVETEMENT

La mise en œuvre du béton dans les tunnels se caractérise par des difficultés liées à la nature de l'ouvrage et par des difficultés d'organisation.

Sans atteindre les volumes de béton mis en œuvre dans les barrages, ceux nécessités par les tunnels longs ou à deux tubes sont néanmoins importants : plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes. Pour un tunnel routier de section normale à deux ou trois voies de circulation, le volume de béton mis en place par mètre linéaire est généralement compris entre 10 et 20 m³.

La mise en place du béton de revêtement de tunnel est toujours délicate. L'accès derrière les coffrages est difficile pour le matériau (nombre de points de bétonnage fixe et limité, encombrement des éléments de soutènement provisoire) et pour les hommes (contrôle visuel de la mise en place, mise en œuvre de la vibration interne).

La protection du béton frais contre les agents extérieurs est délicate : chute d'éléments du terrain encaissant, venues d'eau.

La vibration est difficile : action très limitée de la vibration de surface, accès limité pour la vibration interne qui est pourtant nécessaire pour des épaisseurs de béton supérieures à 30 cm. En effet, un bon serrage est indispensable, d'une part pour remplir tout l'espace contre le terrain et autour des éléments de soutènement, d'autre part pour assurer une bonne compacité du béton, compacité liée aux problèmes d'étanchéité, d'agressivité des eaux, de gel.

La présence de vides à l'extrados peut être à l'origine d'une décompression ultérieure des terrains ou peut favoriser les circulations d'eau conduisant parfois à des dissolutions avec formations de cloches. Il est donc indispensable, dans tous les cas, que soient effectuées des injections de remplissage derrière le revêtement afin d'assurer un bon contact entre le béton et le terrain. Elles font partie intégrante de la méthode.

Le cycle rapide de bétonnage et de décoffrage (l'âge du béton au moment du décoffrage est de l'ordre de 24 à 36 heures) exige une production très régulière de type industriel impliquant une constance dans la qualité des différents matériaux et un matériel de fabrication de bonne fiabilité.

Ce décoffrage rapide implique une organisation rigoureuse des différentes phases de creusement en raison des interférences sur le chantier (abattage, marinage, soutènement,...) et des différentes opérations liées au bétonnage (mise en place des éléments de coffrage, fabrication et transport du béton, cadence de bétonnage).

Cette programmation détermine la fréquence et le volume des gachées, donc la capacité de la centrale et les moyens de transport à mettre en œuvre entre la centrale et le lieu d'emploi.

Un défaut d'organisation peut se traduire par un revêtement ne possédant pas les qualités requises (reprises de bétonnage accidentelles, début de prise mal maîtrisée, par exemple) qu'il est toujours difficile et coûteux de réparer.

Après un arrêt de bétonnage accidentel prolongé, il est pratiquement impossible de déposer le coffrage et de le remettre en place pour traiter la reprise par les moyens appropriés surtout pour les ouvrages importants. En cas de panne du matériel de fabrication ou de mise en place du béton, il est nécessaire de pouvoir disposer rapidement de solutions de rechange.

1.5. RECEPTION DU REVETEMENT

En dehors des résultats d'essais classiques réalisés sur des prélèvements effectués en cours de chantier et sur les carottes extraites du béton en place, un défaut de bétonnage se remarque de diverses façons :

- nids de cailloux en parement,
- fissures avec ou sans infiltrations, quelquefois bien après le décoffrage, toujours délicates à réparer (étant précisé toutefois que la présence de fissures ne dénote pas automatiquement un mauvais béton).

Face à une telle situation, le maître d'ouvrage a deux possibilités :

- refus de l'ouvrage en imposant à l'entrepreneur des réfections partielles ou totales (la démolition d'un anneau est très difficile à réaliser), ou des réparations à l'aide de produits et moyens spéciaux mis en œuvre par des exécutants hautement qualifiés,
- acceptation de l'ouvrage exécuté à un moindre prix, des réfections étant appliquées à l'entrepreneur si les imperfections constatées ne sont pas de nature à porter atteinte à la sécurité, au comportement ou à l'utilisation des ouvrages.

Etant donné la difficulté à définir des critères précis motivant de telles décisions et certains désordres pouvant se manifester après réception, la garantie d'une bonne réalisation des ouvrages ne peut être obtenue que par un **contrôle en amont poussé, associé à des études préalables très élaborées.**

1.6. **SURVEILLANCE - ENTRETIEN - REPARATIONS**

Le revêtement des tunnels doit faire l'objet d'un suivi comme tout ouvrage d'art : fissures, système de drainage, etc. Une inspection détaillée régulière est nécessaire (Instruction technique du 19 octobre 1979 pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 40 - Tunnels, tranchées couvertes et galeries de protection) (figure 8).

La rénovation et la réparation d'ouvrages en service sont en général délicates à concevoir et à mettre en œuvre. En outre, les résultats obtenus dans des conditions difficiles, car il s'agit très généralement de zones où se sont produits des désordres importants, sont assez souvent inférieurs à ce qui était recherché.

Lorsqu'il s'agit de grosses réparations d'un revêtement en béton, il est recommandé aussi bien pour la sécurité des ouvriers que pour la bonne exécution du travail de régler la circulation aux accès et même souvent de l'interdire complètement au moins dans les tranches horaires où elle est la plus faible. Dans le cas d'une galerie hydraulique, il faut bien évidemment mettre cette galerie hors-service.

Enfin, seul l'intrados du revêtement est visible, ce qui complique d'autant les travaux de reconnaissance et de réparation.

Pour toutes ces raisons, il est indispensable d'obtenir à l'exécution une très bonne qualité des bétons de revêtement afin d'éviter autant que possible ces travaux difficiles et coûteux.

1.7. **QUALITES ESSENTIELLES D'UN BETON EN SOUTERRAIN**

En dehors de la résistance contractuelle du béton durci qu'il est nécessaire d'obtenir pour assurer la stabilité de l'ouvrage, les qualités essentielles du béton d'un revêtement coffré de tunnel sont la **maniabilité**, la **compacité** et la **résistance à la fissuration**.

La maniabilité est nécessaire pour obtenir un bon remplissage du coffrage malgré les irrégularités du terrain et la présence des éléments de soutènement. La compacité est nécessaire pour obtenir une étanchéité globale élevée, donc également une bonne résistance au gel et à l'agressivité éventuelle des eaux, agressivité qui réclame souvent des ciments spéciaux.



Figure n° 8. Centrale d'inspection des tunnels routiers. La plate-forme du camion est équipée d'une nacelle élévatrice hydraulique et d'un bras de foration orientable dans toutes les directions alimenté par un groupe compresseur muni d'un épurateur. L'éclairage est assuré par une rampe de quatre projecteurs de 70 W chacun.

Pour les mêmes raisons, il est nécessaire que le retrait du béton soit aussi faible que possible, d'autant que ce retrait n'est pas libre, le revêtement étant solidaire du terrain encaissant sur une face, et que le béton n'est pas armé. Le cas le plus typique est celui des tunnels de grande section qui après percement, sont le siège d'un courant d'air naturel parfois important. La déshydratation rapide et la baisse de la température liées à la vitesse de l'air sont les causes essentielles de l'augmentation du retrait et donc de la fissuration surtout aux jeunes âges.

Enfin, si on désire des temps de coffrage assez courts, on doit être assuré d'avoir une résistance initiale élevée ce qui peut être contradictoire avec la réduction de la fissuration.

La solution adoptée est donc souvent le meilleur compromis entre ces différentes exigences et les conditions réelles d'exécution compte tenu des moyens qu'il est possible de mettre en œuvre.

1.8. CONCLUSION

Lors de l'établissement du marché d'un tunnel comportant un revêtement en béton coffré, l'accent doit être mis sur la nécessité de procéder à une fabrication et à une mise en œuvre selon un schéma industriel.

Dans ce but, toutes les variations des divers paramètres qui influent sur la régularité de la fabrication devront être connues et maîtrisées, à savoir :

- les caractéristiques et la constance des constituants (granulats, ciment, eau, adjuvants éventuels),
- la qualité (fiabilité, précision, rendement) des moyens de stockage et de fabrication (stockage sur parc, organes de pesée, malaxage),
- les propriétés du béton frais, ainsi que celles du béton durci dans les conditions réelles du chantier (conditions de température et d'hygrométrie).

En bref, il s'agit d'éviter les improvisations et de vérifier la compatibilité des moyens et des buts à atteindre, compte tenu des interactions possibles des divers paramètres et de la relative complexité des problèmes posés.

Il paraît donc économiquement rentable de procéder à des études préalables aussi poussées que possible aboutissant à des essais en vraie grandeur selon le schéma industriel. Les contrôles effectués a priori et le plus en amont possible des opérations de bétonnage doivent permettre de vérifier que les caractéristiques des matériaux fournis restent dans les tolérances fixées lors de l'étude. Les contrôles contractuels à postériori, doivent être effectués en fonction de la fiabilité du matériel et du déroulement du chantier. Ils sont indispensables mais doivent pouvoir être modulés quant à leur fréquence.



Figure n° 9. SNCF - Ligne Paris-Mulhouse. Tunnel de Marnay

CHAPITRE 2

NATURE ET QUALITE DES CONSTITUANTS DU BETON

L'étude et le contrôle des bétons sont conduits suivant les spécifications de l'Instruction technique du 15 janvier 1979 sur le contrôle de la qualité des bétons (circulaire n° 79-23 du 9 mars 1979).

Il est à noter que la résistance mécanique du béton, bien qu'étant une caractéristique essentielle à court terme pour les délais de décoffrage ou à moyen ou long terme pour la durabilité de la structure, n'est pas la seule propriété à rechercher. En effet, compte tenu de l'environnement et des difficultés éventuelles de mise en œuvre, d'autres qualités telles que la maniabilité, la compacité, la résistance à la fissuration, au gel ou aux eaux agressives sont à prendre en compte.

2.1 CEMENTS

2.1.1 Dispositions générales

Les liants sont fournis par l'entrepreneur chargé des travaux. Le choix doit être fait parmi les liants hydrauliques faisant l'objet de contrôle de qualité suivis :

- liants normalisés munis du label NF VP (attestant la conformité du produit aux normes françaises)
- liants munis du label VP (contrôlés par le laboratoire de la Ville de Paris).

L'utilisation de liants sans label peut être autorisée par le maître d'œuvre dans certains cas particuliers après essais spécifiques.

Le maître d'œuvre se réserve, d'autre part, la possibilité de refuser des liants qui, bien que munis des labels ci-dessus, proviendraient d'usines dont les produits auraient donné lieu à des incidents.

En cas de besoin, les liants seront choisis sur la liste d'aptitude des ciments pour les structures d'ouvrages d'art et de techniques annexes en béton précontraint non soumises à traitement thermique établie par la C.O.P.L.A. (Commission permanente des liants hydrauliques et des adjuvants du béton).

2.1.2 Choix des liants

Ce choix incombe à l'Entrepreneur chargé de l'exécution des travaux. Il est soumis à l'acceptation du maître d'œuvre.

La nature et la classe du liant doivent être adaptées à la construction et tenir compte du milieu dans lequel elle se trouve.

Dans certains cas douteux, une étude de laboratoire destinée à obtenir l'assurance de la compatibilité du liant avec le milieu peut être exigée.

En général, compte tenu de l'agressivité des eaux en contact avec le béton dans les travaux souterrains (eaux pures, eaux séléniteuses, eaux magnésiennes, eaux de mer...), il est recommandé de n'utiliser que des ciments à forte teneur en laitier (CLK - CHF - CLC), ou après acceptation du maître d'œuvre des ciments destinés aux travaux à la mer et aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates. Ces derniers ciments font l'objet d'une circulaire annuelle du Ministère chargé de l'Équipement.

Après analyse des eaux, il peut être fait emploi de ciments CPA ou CPJ. On tiendra compte dans le choix du ciment de la capacité dissolvante de l'eau analysée et de la nature des sels dissous.

2.1.2.1. Action des eaux de contact

L'action des eaux de contact est très différente de l'action de l'eau de gâchage. Celle-ci est introduite en une seule fois dans le béton et ne se renouvelle pas. Les sels éventuellement nocifs sont généralement en teneur faible.

Les eaux de contact se renouvellent continuellement et disposent le cas échéant d'une réserve pratiquement inépuisable en produits agressifs dissous.

Parmi les eaux agressives, on trouve :

— Les eaux très pures (exemptes de calcaire) et les eaux acidifiées

Les eaux très pures sont des eaux dont le degré hydrotimétrique (TH) est inférieur à 6 (le TH est la teneur en sels calciques et magnésiens). Elles sont très décalcifiantes pour les mortiers et bétons.

Les eaux acidifiées ($\text{pH} < 7$), cas général des eaux pures, attaquent non seulement la chaux libre comme les eaux très pures mais également les éléments du ciment hydraté, silicates et aluminates de calcium.

En présence de ces eaux, il y a lieu d'utiliser des ciments riches en laitier (CLK - CHF - CLC).

— Eaux chlorurées, magnésiennes, salifiées

Les eaux contenant du chlorure de magnésium sont plus agressives que celles contenant du chlorure de sodium en teneur identique.

En présence de ces eaux, il y a lieu d'utiliser des ciments riches en laitier ou des CPA ou CPJ prise mer.

— Eaux chargées en sulfates

L'action de ces eaux est indépendante de la valeur du pH et consiste essentiellement en la combinaison des sulfates de l'eau avec l'aluminate tricalcique (C_3A) du ciment pour former un composé très expansif : le « sel de Candlot » (sulfo-aluminate de calcium - $\text{C}_3\text{A Cs}_3, 31 \text{ H}_2\text{O}$).

En leur présence, il y a lieu d'utiliser uniquement les ciments recommandés par la circulaire 44 du 18.07.1967 du Ministère chargé de l'Équipement relative à l'utilisation des liants hydrauliques dans les ouvrages exposés à l'action des eaux à haute teneur en sulfates.

Plusieurs pays ont établi des prescriptions concernant l'agressivité des eaux sulfatées. La France utilise les prescriptions ASTM indiquées dans le tableau 2.

On observe sur les ouvrages en service que l'attaque par les eaux sulfatées est plus rapide sur les parties en béton soumises à des alternances d'imbibition suivie de dessiccation.

2.1.2.2. Prélèvement des eaux de contact

L'analyse chimique d'un prélèvement d'eau en caractérise complètement l'état si elle est entreprise immédiatement après celui-ci.

A noter que l'agressivité d'une eau qui a déjà suinté à travers le revêtement d'un souterrain n'est plus significative. Il y a lieu de la recueillir dans le terrain encaissant en introduisant jusqu'à la roche un tube de prélèvement.

Agressivité	Teneur en mg/l SO ₄	Choix des ciments
Agressivité nulle	0 - 150	Tout ciment
Faible agressivité	150 - 1000	Ciments prise mer
Forte agressivité Très forte agressivité	1000 - 2000 > 2000	Ciments pour travaux à haute teneur en sulfates

Tableau 2. Teneur en sulfate des eaux de contact.

2.1.2.3. Classe des liants

Dans le cas général pour éviter les risques de fissuration, il y aura lieu de s'en tenir à la classe 45 dont la valeur supérieure du retrait garantie par la norme P 15 301 est de 800 μ /m à 28 jours pour les ciments Portland.

Exceptionnellement, il pourra être fait emploi de ciments des classes 45 R ou 55, mais des précautions particulières devront être prises pour éviter le fissuration. Ces ciments ont un retrait supérieur aux précédents. La norme garantit la valeur supérieure de 1000 μ /m à 28 jours.

2.1.2.4. Dosage

Dans tous les cas, pour les travaux en souterrain, il y a lieu de rechercher une bonne compacité et une bonne imperméabilité. Ces deux propriétés fondamentales du béton en tunnel ne peuvent être obtenues outre l'emploi d'adjuvants qu'avec un dosage relativement élevé (325 à 370 kg de liant par m³) qui doit être mis en relation avec la teneur en fines de granulats. Ce point est repris au paragraphe 2.4.1. ci-dessous.

2.1.2.5. Sujétions de chantier

Comme déjà indiqué, il n'apparaît pas que la résistance mécanique du béton soit la seule caractéristique à rechercher.

L'Entrepreneur devra tenir compte de la nature et de la classe des liants préconisés pour la conduite de son chantier.

En effet, si les ciments à haute teneur en laitier (CLK - CHF - CLC) conviennent pratiquement dans tous les cas d'agressivité du milieu environnant, il y a lieu de ne pas oublier qu'ils sont très sensibles à un excès d'eau, qu'ils ont un durcissement relativement lent et que les délais de décoffrage doivent être augmentés surtout en période froide.

Pour ce qui concerne la maniabilité, là encore il devra être tenu compte de la nature du liant utilisé.

Les bétons à base de CLK ou CHF sont relativement « rêches » alors que les bétons à base de CLC, de CPA ou de CPJ sont plus maniables.

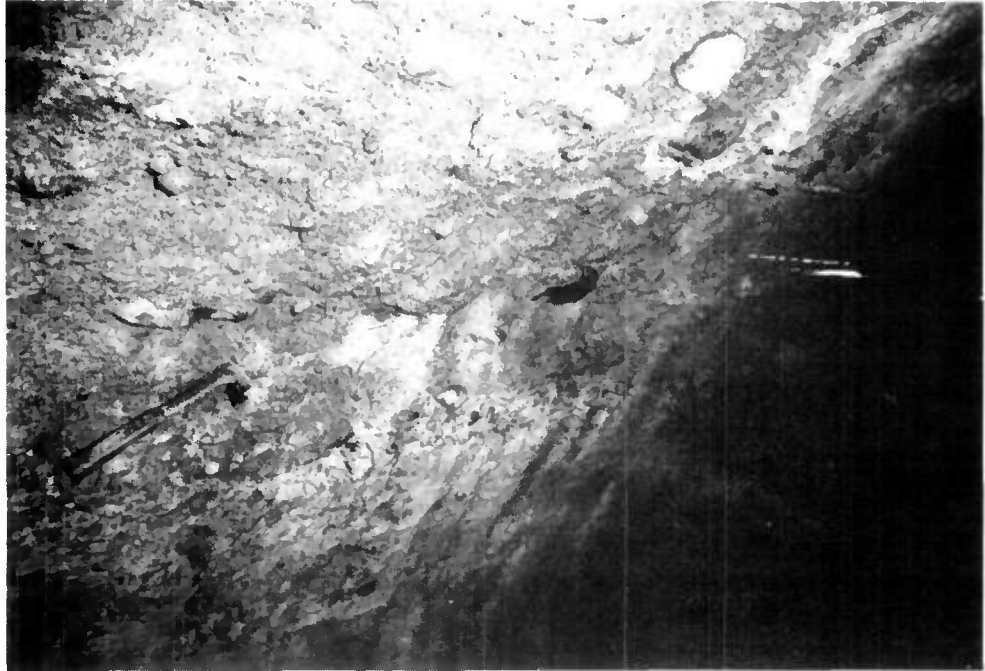


Figure 10. Dégradation de béton à faible teneur en ciment (7 % en poids) mis en œuvre dans une zone humide et subissant un environnement climatique sévère.



2.1.3. *Acceptation des liants*

Dans le cas général, l'acceptation du liant porte donc sur l'adaptation de la nature de ce liant à la nature de la construction et aux conditions du site.

Tout changement de liant en cours de travaux portant sur la provenance, la nature ou la classe doit donner lieu à un nouvel agrément.

L'attention des différents intervenants (Maître d'œuvre, Entrepreneur) est attirée sur les délais à prévoir pour l'étude et la convenance des bétons qui doivent suivre l'acceptation du liant.

2.2. **ADJUVANTS**

Seuls les adjuvants agréés par le Ministère chargé de l'Équipement (COPLA) sont autorisés.

Une liste annuelle des adjuvants agréés avec leurs fiches d'agrément est publiée par ce Ministère sous forme de circulaire.

L'utilisation d'un adjuvant est soumise à l'acceptation du maître d'œuvre. Elle est subordonnée dans tous les cas à une étude spéciale de composition du béton avec épreuve d'étude, épreuve de convenance, essais de plasticité et détermination de la quantité d'air occlus le cas échéant.

Il est rappelé que l'utilisation des adjuvants présente des risques importants du fait des difficultés de réalisation de mélanges homogènes, de la grande précision nécessitée pour les dosages et des effets secondaires de ces produits.

Les principaux adjuvants pouvant être incorporés dans les bétons coffrés en tunnel sont :

- les plastifiants
- les réducteurs d'eau
- les accélérateurs de prise
- les accélérateurs de durcissement
- les entraîneurs d'air
- les fluidifiants
- les hydrofuges de masse

Les normes françaises P 18103 et P 18331 et suivantes donnent les définitions et les caractéristiques des différents adjuvants. Elles sont rappelées ci-après :

Plastifiants : adjuvants dont la fonction principale est, pour une même teneur en eau, d'apporter sans ségrégation une augmentation de l'ouvrabilité d'un béton, mortier ou coulis.

Réducteurs d'eau : adjuvants, dont la fonction principale est, à même ouvrabilité, d'apporter une réduction de la teneur en eau d'un béton, mortier ou coulis.

Ces deux types d'adjuvants possèdent parfois des fonctions secondaires, complémentaires. C'est ainsi que des plastifiants peuvent être réducteurs d'eau, et que des réducteurs d'eau peuvent également être plastifiants.

Leur emploi est intéressant car ils permettent dans une certaine mesure d'augmenter la compacité finale du mélange et la résistance mécanique tout en facilitant la mise en œuvre du béton dans les moules.

Toutefois, il faut noter qu'ils peuvent dans certains cas modifier les temps de prise et de durcissement et que pour certains d'entre eux des surdosages entraînent par exemple des retards de prise importants.

Accélérateurs de prise : adjuvants dont la fonction principale est de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans le béton, mortier ou coulis. Un effet secondaire peut être de modifier le développement des résistances du béton, mortier ou coulis.

Accélérateurs de durcissement : adjuvants dont la fonction principale est d'accélérer le développement des résistances initiales du béton, mortier ou coulis. Un effet secondaire peut être de modifier la durée de prise.

Pour ces deux types d'adjuvants, l'accélération recherchée s'accompagne presque toujours d'une chute de résistance mécanique à moyen et long terme par rapport au témoin. Il est donc nécessaire de s'assurer par des essais de convenance effectués suffisamment tôt avant l'ouverture du chantier (des essais à 90 jours devant être exigés) que les résistances finales obtenues sont acceptables.

Entraîneurs d'air : adjuvants dont la fonction principale est d'entraîner la formation dans le béton, mortier ou coulis, de micro-bulles d'air restant uniformément réparties dans la masse.

Ces adjuvants améliorent l'ouvrabilité, permettent une réduction de l'eau de gachage et diminuent la ségrégation.

Ils améliorent d'une façon spectaculaire la résistance au gel des bétons durcis.



Figure 11. Détérioration de béton par gonflement.

Le SO_2 des échappements de poids lourds en atmosphère humide et riche en CO_2 attaque la tobermorite ($3 CaO, 2 SiO_2, 3 H_2O$) du ciment pour former de la thaumasite ($Ca_3, SiO_2, CO_3 SO_4, 14,5 H_2O$) en efflorescences blanches fibreuses.

Ce minéral est expansif et provoque la désagrégation du béton.

L'attention est toutefois attirée sur les chutes de résistance par rapport au témoin qui peuvent être constatées sur des bétons ainsi adjuvantés.

A titre d'exemple, 10 % d'air occlus dans le béton fait chuter la résistance de 50 % en compression et de 30 % en traction.

Il importe donc en cas d'emploi d'entraîneurs d'air de pouvoir contrôler systématiquement la teneur en air occlus et de vérifier comme pour les accélérateurs de prise et de durcissement que les résistances finales obtenues sont acceptables.

Fluidifiants : adjuvants qui, introduits dans un béton, mortier ou coulis peu de temps avant sa mise en œuvre, ont pour fonction principale de provoquer, sans ségrégation, un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

Ces adjuvants sont employés pour faciliter la mise en œuvre des bétons dans les coffrages. Il y a lieu de faire attention aux surdosages car ils peuvent entraîner une ségrégation ou un retard de prise important.

De plus, leur action est limitée dans le temps. Leur introduction dans le béton frais doit donc être déterminée en fonction des délais de transport et des cadences de bétonnage.

Hydrofuges de masse : adjuvants dont la fonction principale est de réduire la pénétration de l'eau à travers les bétons et mortiers durcis.

Ces produits ne sont vraiment efficaces que si le béton est de bonne qualité, bien compact et homogène.

Suivant les compositions des différents produits actuellement sur le marché, ils peuvent occasionner des retards de prise, améliorer l'ouvrabilité, diminuer les résistances mécaniques ou augmenter le retrait par exemple.

2.3. EAU DE GACHAGE

Dans l'attente de la révision de la Norme Française P 18303, les prescriptions suivantes concernant la fourniture de l'eau de gâchage peuvent être appliquées :

- elle ne doit pas contenir plus de 2 g/litre de matières en suspension
- elle ne doit pas contenir plus de 2 g/litre de sels dissous et sous réserve que ces sels ne risquent pas de nuire à la conservation des bétons (acides, sulfates, matières organiques...)

L'eau en provenance de puits, rivières ou mares, doit être soumise à des analyses physico-chimiques.

L'eau en provenance d'un réseau de distribution d'eau potable est admise sans analyse préalable.

2.4. GRANULATS

Les normes applicables sont les normes NF P 18301, P 18304 et la série des normes d'essais P 18554 à P 18598.

La diversité de destination des bétons coffrés en tunnels (bétons de remplissage, de

revêtement non armé, béton armé et parfois précontraint) implique des exigences variables, quant aux caractères spécifiés des granulats entrant dans la composition des bétons.

Le tableau n° 3 récapitule la liste des caractères spécifiés et de leur valeur recommandée pour la rédaction d'un C.C.T.P. Pour certains de ces caractères, deux valeurs sont indiquées, le niveau de valeur A correspondant à des critères de qualité supérieurs à ceux du niveau de valeur B. Pour un béton donné, il est possible de choisir le niveau de

GRANULAT	PROPRIETE DU GRANULAT ET CARACTERE SPECIFIE	NIVEAU DE VALEUR		OBSERVATIONS
		A	B	
Sables	Propriétés géométriques			à spécifier par le maître d'œuvre
	D	—	—	
	Teneur en fines ≤ 80 mm — sables alluvionnaires — sables de concassage	$\leq 6\%$ $\leq 6\%$	$\leq 6\%$ $\leq 10\%$	
	Tolérance sur module de finesse	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	
Graviers	d et D définis par NF-P 18304	$1/3 < \frac{d+D}{2} < 2/3$		si D < 2,5 d
	Coefficient d'aplatissement	$\leq 30\%$	$\leq 30\%$	
	Résistances mécaniques			
Sables	Coefficient de friabilité	≤ 15	≤ 40	
Graviers	Coefficient Los Angeles	≤ 25	≤ 40	
	Coefficient Microdeval en présence d'eau	≤ 20	≤ 35	
	Propriétés physiques			
Sables	Equivalent du sable - E.S. — sables alluvionnaires — sables de concassage	80 déconseillé	75 65	
	Si E.S. inférieur, valeur de bleu		≤ 1 g/100 g de fines	
Graviers	Passant à 0,5 mm — alluvionnaires — roches massives	$\leq 2\%$ $\leq 5\%$ avec valeur de bleu	$\leq 2\%$ ≤ 1 g/100 de fines	
	Absorption d'eau	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	
	Homogénéité ($\alpha = 0,4$)	$\leq 97\%$	$\leq 90\%$	
	Propriétés physico-chimiques			
Sables et graviers	Teneur en sulfates et sulfures	$\leq 0,4\%$	$\leq 0,4\%$	
	Teneur en chlorures	cf. DTU 21.4	cf. DTU 21.4	
	Matières organiques	essai colorimétrique négatif		
	Insensibilité à l'environnement	Identification et essais d'altérabilité et de réactivité s'il y a lieu		

Tableau 3. Caractères spécifiés des granulats.

valeur A pour certains caractères et le niveau de valeur B pour les autres. Le présent texte est destiné à aider le rédacteur d'un C.C.T.P. à choisir la valeur la plus appropriée de ces caractères en fonction de la destination du béton.

2.4.1. Teneur en fines des sables de concassage

Le définage d'un sable de concassage est coûteux. D'autre part, pour qu'un béton présente une maniabilité maximale à dosage en eau donné et que sa compacité soit maximale, il faut que sa formulation en ciment + fines soit optimale. Cet optimum peut être déterminé expérimentalement. **Le dosage de ciment + fines est de l'ordre de $700/\sqrt[5]{D}$.** On fixe la teneur en fines admissible du sable du concassage d'après le dosage en ciment prévu et la valeur optimale ciment + fines souhaitée.

D en mm	16	20	25	32	40
$\frac{700}{5\sqrt[5]{D}}$ en kg	400	385	370	350	335

Tableau 4. Dosage ciment + fines.

2.4.2. Tolérance sur le module de finesse des sables

La variation du module de finesse du sable dépend de l'équipement de l'installation productrice et également du prix du sable. Une trop grande variabilité du module de finesse du sable peut entraîner une variation de maniabilité du béton qu'il faut alors compenser par des ajouts d'eau. La tolérance de $\pm 0,3$ sera prescrite dans le cas de chantiers de longue durée nécessitant des livraisons de sable très étalées dans le temps, celle de $\pm 0,6$ dans le cas de faible volume de béton ou de bétons peu performants.

2.4.3. Coefficient d'aplatissement des graviers

Un excès de grains plats ou en aiguilles peut entraîner des dosages en eau élevés pour obtenir un béton de maniabilité requise. La valeur du tableau est normalement spécifiée.

2.4.4. Résistances mécaniques des granulats

Ces caractères, et surtout le coefficient de friabilité des sables influent sur la régularité de fabrication du béton et sur sa résistance mécanique.

Le niveau A est prescrit dans le cas des bétons devant résister à l'usure ou présenter une résistance élevée à la compression. Le niveau B est normalement prescrit dans les autres cas.

2.4.5. Propreté des granulats (essai au bleu)

Les argiles provoquent des chutes de résistance mécanique du béton. Il convient donc d'être très vigilant sur la propreté des granulats d'autant que le lavage est parfois difficile.

Le niveau A est prescrit pour les bétons à résistance mécanique élevée. Le niveau B est normalement prescrit dans les autres cas.



Figure 12. Tunnel André Malraux (Cimiez) - Nice.

2.4.6. *Homogénéité*

Ce caractère vise la présence de grains friables ou altérés dont la présence en proportions trop fortes influe sur la régularité de fabrication du béton et sur ses propriétés mécaniques.

Le niveau A est normalement prescrit. Le niveau B est accepté en l'absence d'exigences particulières de résistance mécanique du béton et si l'ambiance n'est pas agressive.

2.4.7. *Insensibilité à l'environnement*

Actuellement, ni la tendance à l'altération des granulats, ni les risques de réactions alcalis-griculats, ne peuvent faire l'objet de spécifications chiffrées. Cependant un spécialiste peut, au vu d'essais d'identification, indiquer si les granulats sont acceptables. Il est donc recommandé de faire effectuer ces essais à un laboratoire spécialisé si les granulats n'ont pas de références d'emploi.



Figure 13. Autoroute A 8 - Tunnel du Col de Guerre - Tête ouest.

CHAPITRE 3

SPECIFICATIONS DES BETONS

EPREUVES D'ETUDE, DE CONVENANCE ET DE CONTROLE

L'Instruction Technique du 15 janvier 1979 (Circulaire n° 79-23 du 9 mars 1979) relative au contrôle de la qualité des bétons s'applique aux ouvrages en béton armé ou en béton précontraint.

Bien que dans la majorité des cas le revêtement coffré des tunnels et galeries soit réalisé en béton non armé, on appliquera les spécifications de cette Instruction Technique.

Le présent chapitre résulte de l'adaptation de l'Instruction Technique au problème spécifique des bétons coffrés en tunnel. Le projeteur pourra se reporter utilement au texte intégral de l'Instruction et à ses commentaires.

Les valeurs chiffrées qui figurent dans le texte pour certaines spécifications sont celles qu'on rencontre habituellement sans qu'elles aient un caractère réglementaire. Elles peuvent être modifiées en fonction des caractères particuliers du projet.

3.1. SPECIFICATIONS DES BETONS

3.1.1. *Un béton est défini contractuellement* dans le C.C.T.P. par :

- des spécifications de caractères
- des prescriptions de moyens

3.1.2. *Les spécifications des bétons* fixent :

- les caractères spécifiés
- les paramètres de distribution des valeurs des caractères spécifiés
- les valeurs requises de ces paramètres

3.1.2.1. *Les caractères spécifiés sont dans tous les cas :*

- la consistance du béton frais
- la résistance à la compression à 28 jours dans des conditions normalisées
- la nature et la teneur minimale en ciment
- le diamètre maximal des granulats.

s'il y a lieu :

- les caractères liés aux conditions de calcul, d'exécution ou d'exploitation particulières à l'ouvrage

Il peut s'agir par exemple :

- de la résistance à la traction à 28 jours
- de la résistance à la compression ou à la traction aux jeunes âges liées aux opérations de décoffrage
- de la résistance à la traction ou à la compression mesurée sur des éprouvettes de béton conservées dans des conditions non normalisées (représentatives des conditions existant sur le site).

3.1.2.2. Paramètres de distribution

– Consistance

Le C.C.T.P. fixe une valeur minimale et maximale : slump compris entre 6 et 10 cm (béton plastique), par exemple.

– Résistance à la compression

Le C.C.T.P. fixe une valeur caractéristique f_{ck} et une valeur minimale $f_{c \text{ min}}$ à 28 jours (voir tableau 5).

Pour les ouvrages concernés par le présent guide, on pourra admettre les valeurs suivantes pour le béton armé ou non :

$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ $f_{c \text{ min}} = 21,5 \text{ MPa}$

– Dosage minimal en ciment

Le C.C.T.P. fixe un dosage minimal en ciment pour chaque béton : 325 kg/m³ pour le béton non armé, 350 kg/m³ pour le béton armé (voir paragraphe 2.1.2.4. ci-dessus).

– Le diamètre maximal des granulats D

Le C.C.T.P. fixe D , par exemple, 25 mm pour le béton de voûte en fonction des moyens de transport et de mise en place.

Pour les éléments armés de faible épaisseur tels que les cloisons de ventilation, D peut être plus faible (15 mm).

Pour les sables, D est fixé à 6,3 mm

– Résistance au moment du décoffrage

La résistance minimale en compression à atteindre au moment du décoffrage de la voûte dans des conditions de durcissement prévisibles sur le site est de l'ordre de 7 à 8 MPa pour un tunnel de 10 m de diamètre et une épaisseur de revêtement de 0,40 m.

– La résistance à la compression à 28 jours dans des conditions de conservation non normalisée.

Le C.C.T.P. spécifie si la résistance à la compression requise doit être atteinte dans des conditions de conservation correspondant aux conditions prévisibles sur le site (température, hygrométrie).

3.1.3. Prescriptions de moyens

Les prescriptions de moyens peuvent porter sur :

- la nature et l'origine des constituants
- le dosage de chacun d'eux
- les moyens de fabrication du béton

- le transport du béton
- les conditions de mise en œuvre et de durcissement.

Ces derniers points sont examinés dans les chapitres ci-après.

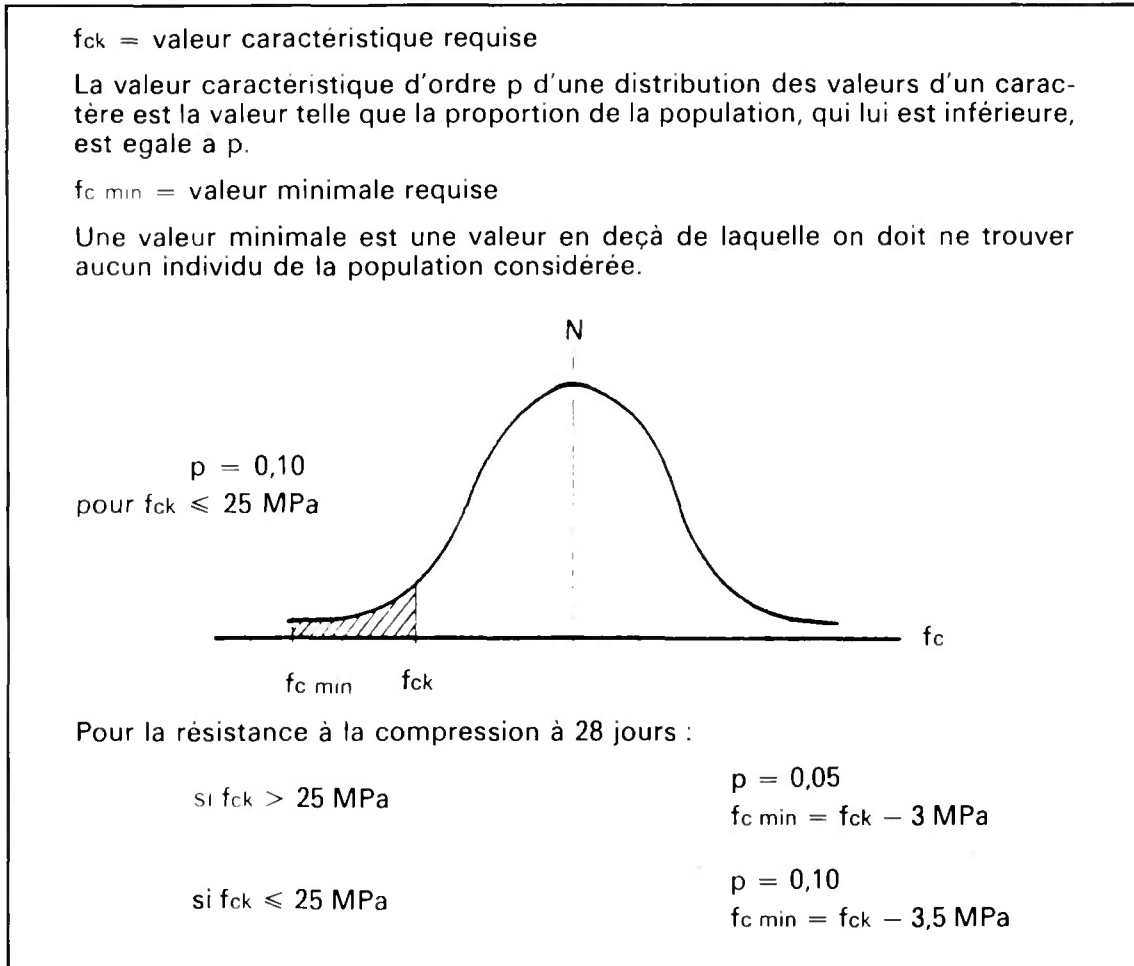


Tableau 5. Paramètres de distribution des résistances.

3.2. EPREUVE D'ETUDE

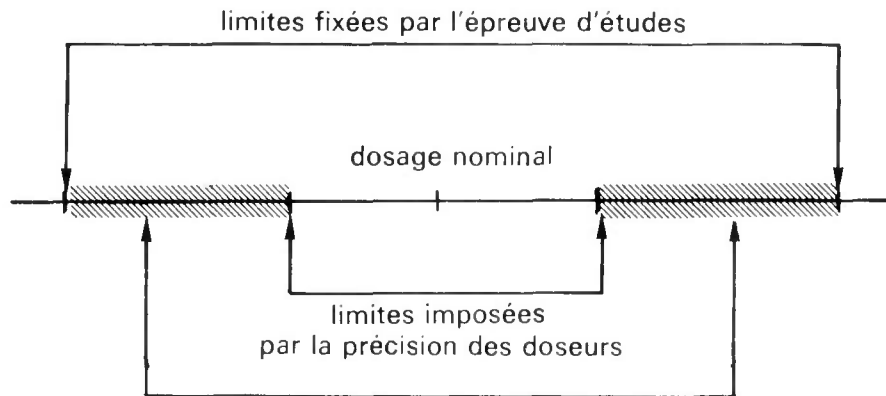
3.2.1. L'étude d'un béton comporte :

- la détermination de la formule nominale
- l'exécution de l'épreuve d'étude.

3.2.2. La formule nominale d'un béton fixe :

- la nature et la qualité des constituants (sans oublier les adjuvants éventuels)
- le dosage nominal et les valeurs extrêmes des proportions de chaque constituant.

Ces valeurs extrêmes sont bornées d'une part par la précision des moyens de fabrication et d'autre part par les limites choisies dans l'épreuve d'étude.



plages dans lesquelles doivent être comprises les valeurs extrêmes

3.2.3. L'épreuve d'étude a pour objet :

- de vérifier que la formule nominale du béton permet de satisfaire les exigences de qualités fixées par les spécifications
- de vérifier que ces exigences seraient encore respectées si les proportions des constituants atteignaient les valeurs limites tolérées
- de vérifier que ces exigences seraient encore respectées si la qualité des constituants atteignait les limites tolérées par les spécifications auxquelles ils sont assujettis.

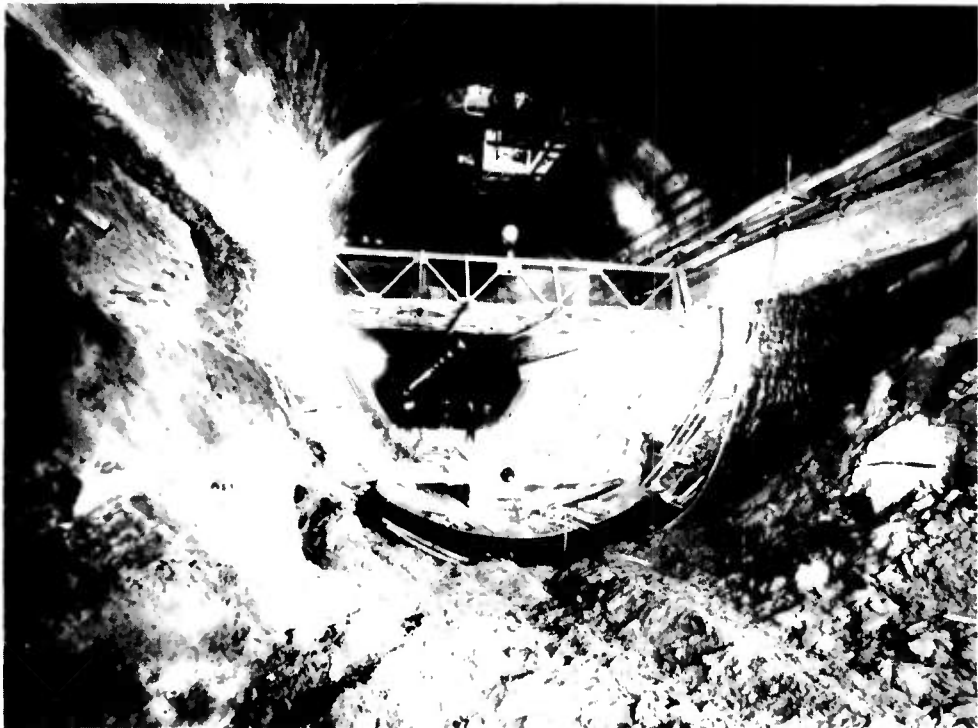


Figure 14. Autoroute A 6 - Tunnel sous Fourvière. Bétonnage de la partie inférieure de l'anneau externe.

3.2.4. Exécution et interprétation de l'épreuve d'étude

3.2.4.1. Béton sans référence (cas le plus fréquent)

L'épreuve d'étude nécessite d'exécuter :

- 3 gâchées avec la formule nominale
- 2 gâchées dérivées de la formule nominale en faisant varier $\frac{S}{S + G}$ de + et de – 10 %
- 2 gâchées en faisant varier la quantité d'eau de + et de – 10 litres
- 2 gâchées en faisant varier la quantité de ciment de + et de – 25 kg/m³ de béton avec réajustement éventuel de la formule.

Sur chacune de ces gâchées, il faut effectuer :

- un essai de consistance et de maniabilité
- un essai de résistance à la compression à 28 jours (moyenne arithmétique sur 3 éprouvettes)
- un essai de résistance à la compression à l'âge prévu pour le décoffrage
- un essai de résistance à la traction s'il y a lieu
- sur le ciment utilisé pour l'épreuve d'étude, un essai de résistance à la compression dans les conditions normalisées et un prélèvement conservatoire tel que prévu à la norme NF P 18300.

L'épreuve d'étude sera réputée probante si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- tous les résultats de consistance sont dans les fourchettes requises par le C.C.T.P.
- la moyenne arithmétique (notée f_{cE}) des 3 essais (9 éprouvettes) de résistance à la compression à 28 jours effectuées sur les 3 gâchées répondant à la formule nominale vérifie :

$$\begin{cases} f_{cE} \geq f_{ck} + \lambda (CE - C_{min}) \\ f_{cE} > 1,1 f_{ck} \end{cases}$$

avec :

- f_{ck} = valeur caractéristique requise de la résistance à la compression à 28 jours
- $\lambda = 1$ dans le cas général
- CE = résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve d'étude
- C_{min} = valeur minimale garantie de la résistance à la compression à 28 jours du ciment, fixée par la norme, compte tenu de la classe du ciment
- les résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours effectués sur les formules dérivées de la formule nominale sont compris dans la fourchette :

$$f_{cE} \pm 15 \% f_{cE}$$

- les résultats des autres essais vérifient les valeurs requises fixées au C.C.T.P.

3.2.4.2. Le béton dispose de références

Les conditions posées pour que l'on puisse considérer qu'un béton dispose de références sont telles que ce cas ne se retrouvera que très rarement.

On ne le rencontre que lors de la réalisation de tunnels voisins construits à des dates rapprochées (cas des doubléments, par exemple).

Dans ce cas, on pourra se dispenser de l'épreuve d'étude si :

- le béton a été utilisé pendant plus de 6 mois à une date rapprochée
- le nombre n de prélèvements a été supérieur ou égal à 30.

Ces populations tiendront lieu d'épreuve d'étude probante si les conditions suivantes sont remplies :

- 95 % au moins des essais de consistance sont dans la fourchette requise
- la moyenne arithmétique des n résultats d'essais de résistance à la compression à 28 jours (notée f_c) est supérieure ou égale à

$$f_{ck} + K S_n$$

où $K = 1,5$ si $f_{ck} \leq 25$ MPa
 S_n = écart type des n résultats d'essais de résistance à la compression à 28 jours (si $S_n < 0,07 f_c$, il sera pris égal à $0,07 f_c$ dans la formule)

Les autres caractères spécifiés sont étudiés lors de l'essai de convenance.

3.3. EPREUVE DE CONVENANCE

L'épreuve de convenance est effectuée avant toute mise en fabrication du béton qui sera coulé sur le chantier ; elle est faite sur le chantier de l'ouvrage, avec les matériaux approvisionnés, dans les conditions et avec les moyens du chantier. Si un de ces éléments est modifié avant le début du bétonnage, l'entrepreneur doit refaire une épreuve de convenance, éventuellement simplifiée selon l'élément modifié et en accord avec le maître d'œuvre.

Le C.C.T.P. fixe le délai et la consistance précis de l'épreuve de convenance ; il indique notamment la (ou les) partie(s) d'ouvrage qui nécessite(nt) de mettre en œuvre le béton dans un élément de coffrage significatif (béton témoin). L'épreuve de convenance est



Figure 15. Tunnel routier du Fréjus. Bétonnage de la dalle des gaines de ventilation.

conduite dans des conditions significatives de la durée maximale de transport tolérée, compte tenu de la température. Elle implique au moins la vérification complète du respect des prescriptions de moyens et l'exécution de trois gâchées telles que la composition visée du béton soit la composition nominale. Ces gâchées donnent lieu aux prélèvements et essais prévus ci-dessus (en 3.2.4.1.) pour l'épreuve d'étude, l'interprétation étant celle visée dans ce même paragraphe.

Il faut toutefois remarquer que l'épreuve de convenance ne peut reproduire toutes les conditions qui se retrouveront sur le chantier, en particulier pour la température, l'hygrométrie, la vitesse de l'air dont l'influence sur les résultats au cours du chantier peut être importante.

3.4. EPREUVE DE CONTROLE

Elle est effectuée sur un **prélèvement fait immédiatement avant le coulage du béton.**

3.4.1. *Lotissement*

Dans le cas des tunnels, un lot de béton défini par le C.C.T.P., correspond à un anneau de voûte, à un piédroit, à un plot de plafond ou de cloison.

Il s'agit d'une partie de l'ouvrage bétonnée en une seule fois avec le même béton, les mêmes moyens de fabrication, de transport et de mise en place.

3.4.2. *Echantillonnage et essais*

Le C.C.T.P. fixe, en même temps que la définition du lot, le nombre n de prélèvements relatifs à chaque lot :

Pour le béton de voûte, ce nombre sera égal à 3 ou à 4 dans le cas d'anneaux importants (volume de béton supérieur à 100 m³). Pour d'autres lots de moindre importance (trottoirs par exemple), ce nombre pourra être réduit en fonction de la probabilité d'avoir un béton conforme. On peut également l'augmenter en période de démarrage de chantier.

Sur chaque prélèvement, on réalise :

- 1 cône d'Abrams
- 3 éprouvettes pour la résistance à 28 jours.

Le C.C.T.P. peut ne prévoir qu'une ou deux éprouvettes par prélèvement.

D'une manière générale, il vaut mieux prévoir 3 prélèvements avec 2 éprouvettes par prélèvement plutôt que 2 prélèvements avec 3 éprouvettes. L'échantillonnage est plus représentatif.

3.4.3. *Critères de conformité*

3.4.3.1. *Consistance*

Les résultats doivent être à l'intérieur de la fourchette requise.

3.4.3.2. *Résistance à la compression à 28 jours*

Le lot sera considéré conforme si :

$$\begin{cases} \bar{f}_c \geq f_{ck} + k_1 \\ f_{c1} \geq f_{ck} - k_2 \end{cases}$$

\bar{f}_c : moyenne arithmétique des n résultats

f_{c1} : valeur minimale des n résultats

f_{ck} : résistance caractéristique requise

k_1 et k_2 : coefficients dont les valeurs (en MPa) sont données ci-dessous.

1^{er} cas : Cas général

On dispose :

- des résultats des épreuves préalables jugés satisfaisants,
- d'informations suffisantes sur la fiabilité du matériel de fabrication, sur les contrôles en cours de fabrication et sur les suites données aux résultats de ces contrôles.

La fiabilité du matériel de fabrication concerne essentiellement la précision obtenue sur les proportions de chaque constituant et de la fidélité de ces proportions aux ordres donnés par le responsable de la centrale (précision des balances, automatismes, sécurités).

Les contrôles en cours de fabrication portent selon des modalités à adapter à la nature de l'élément à construire sur :

- la qualité et la régularité des constituants
- la qualité du stockage et des opérations de manutention
- la teneur en eau des granulats et la détermination de l'eau supplémentaire à introduire
- l'enregistrement de la puissance absorbée par le malaxeur (wattmètre différentiel) ou tout autre procédé analogue
- l'enregistrement des pesées des constituants ou l'existence d'une alerte lorsque ces pesées sont en dehors des tolérances.

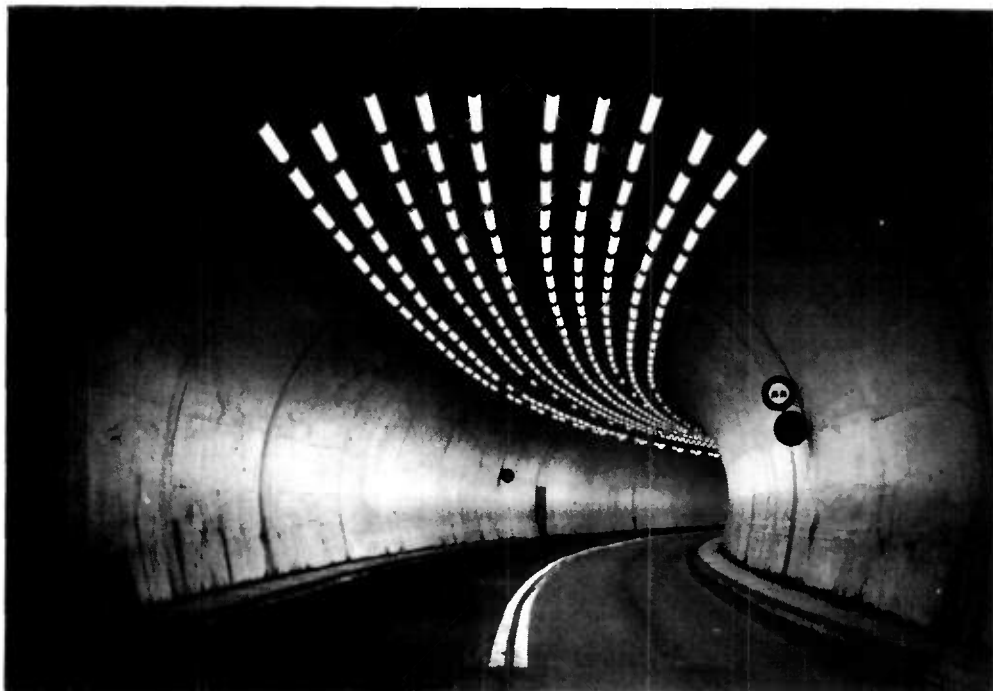


Figure 16. Tunnel sous le Mont-Blanc.

Les conditions à remplir pour $n = 3$ et $f_{ck} \leq 25$ MPa sont :

$$\begin{cases} \bar{f}_c > f_{ck} + 1,5 \\ f_{cl} > f_{ck} - 3,5 \end{cases}$$

2^o cas : Il s'agit du cas où l'une au moins des conditions appartenant au cas 1 n'est pas respectée.

On doit alors avoir :

$$\begin{cases} \bar{f}_c > f_{ck} + 4 \\ f_{cl} > f_{ck} - 1 \end{cases}$$

Comme on peut le remarquer, les valeurs de k_1 et de k_2 sont tellement pénalisantes qu'il est alors préférable d'imposer les prescriptions nécessaires pour que le cas 1 soit applicable.

3.4.4. *Acceptation des bétons*

Un lot reconnu conforme aux prescriptions est accepté. Sinon, on peut considérer les cas suivants :

3.4.4.1. *Consistance*

Si le résultat d'un essai de consistance est extérieur à la fourchette requise, la gâchée correspondante sera rebutée et la gâchée suivante fera l'objet d'un nouveau prélèvement pour essai de consistance. Si le résultat est encore extérieur à la fourchette requise, le bétonnage sera arrêté jusqu'à détermination des causes de l'anomalie et modification du réglage. La première gâchée fabriquée à partir de ce nouveau réglage fera l'objet d'un essai qui devra se situer dans la fourchette requise.

3.4.4.2. *Résistance à la compression*

Si les valeurs requises ne sont pas atteintes, il faut :

- détecter la cause de la dérive, y remédier et éventuellement réaliser une nouvelle épreuve de convenance
- examiner de près l'état du lot réalisé avec un béton non conforme et prescrire si cela se révèle nécessaire le renforcement ou même la démolition de ce lot. Ce point a été évoqué au paragraphe 1.6 ci-dessus.

3.5. **EPREUVE D'INFORMATION**

Les épreuves d'information peuvent porter sur :

- la résistance à la compression au décoffrage
- la résistance à la compression à 90 jours
- l'influence de la vibration par carottage en place, en particulier dans les parties qui ne peuvent être convenablement compactées par la vibration interne (aux extrémités des plots et en calotte).

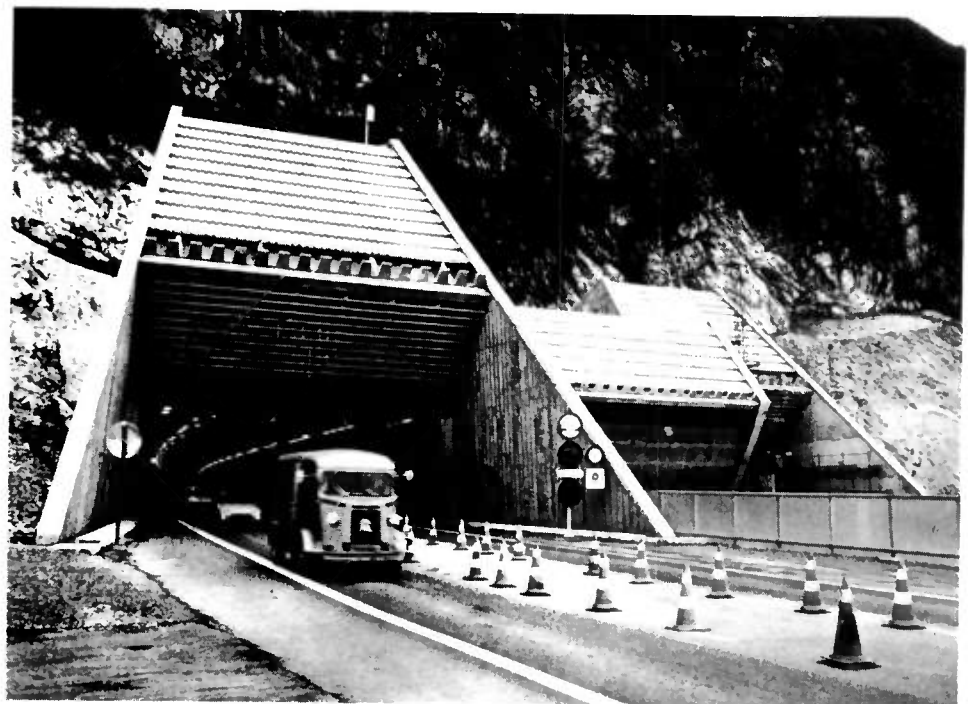


Figure 17. Autoroute A 43 - Tunnel de l'Épine - Tête Ouest.

CHAPITRE 4

LE MATERIEL DE BETONNAGE

4.1. LA FABRICATION DU BETON

Le matériel de fabrication du béton d'ouvrages souterrains ne présente pas de caractères particuliers. Il suffit de se reporter aux recommandations existantes sur la réalisation des ouvrages d'art en général.

On peut toutefois noter un certain nombre de points qui tiennent plus à l'organisation du chantier qu'au matériel lui-même :

- le béton sera fabriqué par une ou deux centrales de capacité suffisante suivant que l'avancement sera effectué d'un seul côté ou simultanément par les deux têtes et suivant les possibilités de liaison entre ces deux têtes ;
- la fourniture du béton par une centrale de béton prêt à l'emploi est possible si la centrale et les formules proposées sont acceptées par le Maître d'Œuvre et si le fabricant du béton admet les contraintes particulières du bétonnage en souterrain telles que le travail à trois postes.

En fait, dans le cas général, les centrales de béton prêt à l'emploi ne sont utilisées que comme centrale de secours. L'exception à cette règle concerne les tunnels urbains lorsque l'exiguïté des installations de chantier ne permet pas le montage d'une centrale sur le site.



Figure 18. Autoroute A.40. Tunnel de Chamoise. Centrale de fabrication du béton tête Neyrolles.

4.2. LE TRANSPORT DU BETON

4.2.1. Généralités

Le transport du béton de la centrale au coffrage est effectué habituellement en deux phases distinctes pour lesquelles sont utilisés des matériels fondamentalement différents. Dans la première phase, le béton est transporté de la centrale jusqu'à proximité du lieu de bétonnage. Ensuite, il est repris et mis en place dans les coffrages.

4.2.2. Matériel de transport de la centrale au lieu de bétonnage

Le procédé de transport le plus usuel est le malaxeur porté.

Le transport par malaxeur peut être assuré soit sur rails, soit sur pneumatiques. Dans ce dernier cas, il est très souhaitable de prévoir un radier provisoire qui permet d'avoir un chemin de roulement stable.

Les paramètres sur chantier qui doivent être pris en compte pour le choix d'un type de matériel, sont les suivants :

- longueur et section de l'ouvrage ;
- mode de transport du chantier de creusement et en particulier de l'atelier de marinage (transport sur rails ou sur pneumatiques) ;
- calendrier de bétonnage.
Il faut différencier le cas du chantier de bétonnage à l'avancement du cas du chantier indépendant, surtout lorsque le transport est réalisé sur pneumatiques ;
- cadence de bétonnage.
Ce paramètre est évidemment lié aux appareils de mise en place (pompes, sauterelles), ainsi qu'à la capacité de la centrale à béton. Il conditionne le nombre de véhicules dont on doit disposer et leur capacité.

4.2.3. Matériel de mise en place

Ce matériel comprend les pompes à béton, ou les sauterelles. On peut encore trouver sur certains petits chantiers des transporteurs pneumatiques.

Ce matériel doit assurer un bon clavage du béton, particulièrement en clé de voûte et des piédroits en sous-œuvre.

Son rendement ainsi que l'existence de matériel de secours doivent être étudiés soigneusement en fonction du parti constructif choisi.

4.2.3.1. Pompes à béton

En dehors des clavages qui sont délicats à réaliser correctement, l'emploi de pompes à béton en souterrain ne diffère pas de celui sur chantier courant.

Il convient de se reporter aux recommandations du guide de chantier Niveau 3 (extrait du GGOA 70) édité par le SETRA : Utilisation des pompes pour le transport du béton.

On doit signaler que certains constructeurs ont conçu des matériels spécialement adaptés au bétonnage en souterrain (figure 19).

4.2.3.2. Transporteurs à bandes

Ce matériel ne peut être utilisé que pour le bétonnage du radier ou lorsque les coffrages ont une ouverture supérieure suffisamment large et sont peu élevés. Dans tous les cas, le béton doit tomber d'une hauteur aussi faible que possible en restant inférieure à 1,50 m.

Cette solution ne peut être envisagée qu'à titre exceptionnel et pour des bétons dont on n'exige pas de caractéristiques particulières.

Les transporteurs à bande doivent être équipés d'une trémie à l'extrémité aval pour empêcher la chute de matériaux et d'un système de raclette pour éviter les pertes de laitance à chaque extrémité.

4.2.3.3. *Transporteurs pneumatiques*

Bien qu'il soit de plus en plus abandonné au profit des pompes mécaniques, ce moyen de transport peut encore être utilisé dans certaines galeries de petits diamètres.

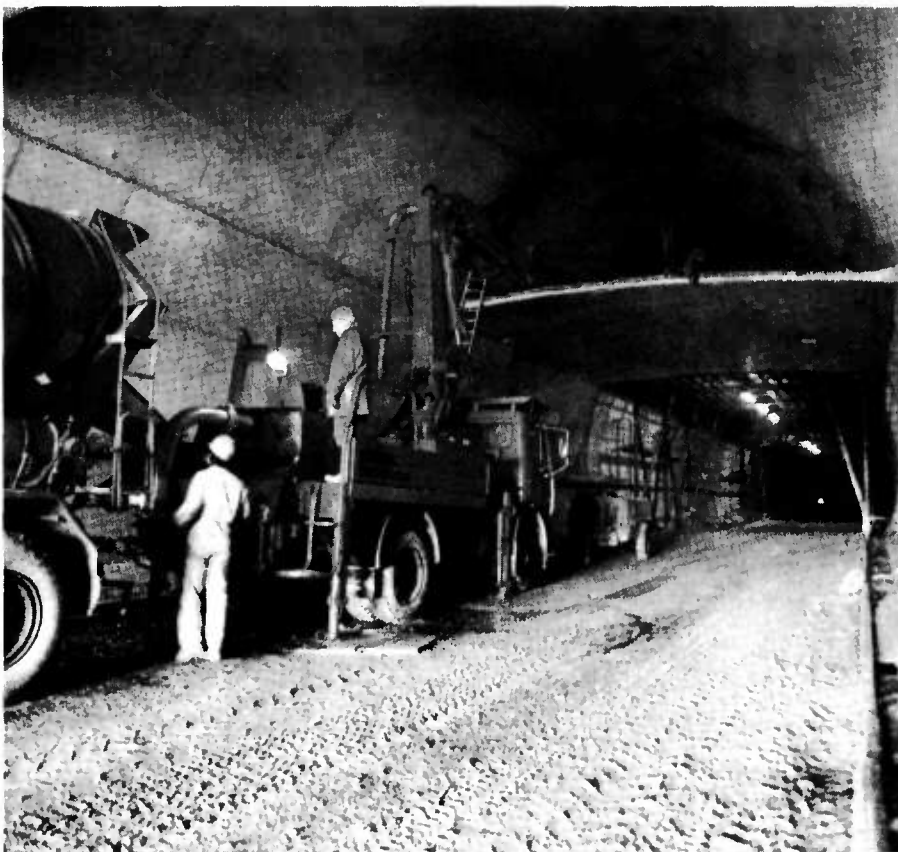
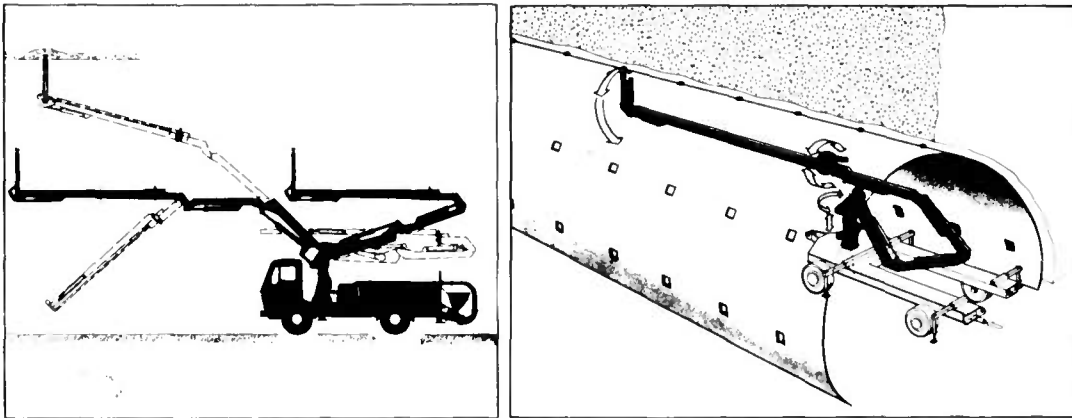


Figure 19. Mat de bétonnage pour tunnel (Document Schwing).

4.3. LE COFFRAGE

Les coffrages utilisés en tunnel constituent l'outil le plus spécifique et le plus délicat à maîtriser.

Leur conception et leur utilisation conditionnent largement la qualité finale de l'ouvrage aussi bien pour le respect de la géométrie que pour la qualité intrinsèque du revêtement dans la masse et en surface.

Le Maître d'Œuvre et l'Entrepreneur doivent se préoccuper très tôt de ce problème en relation avec le constructeur de coffrage.

Après une description des différents types de coffrage, il sera défini le cheminement des études et les relations contractuelles qui doivent conduire au respect des spécifications figurant au C.C.T.P.

4.3.1. Définitions

Les coffrages utilisés dans les travaux souterrains ont des caractéristiques particulières liées à leurs conditions d'emploi :

- surfaces à coffrer de forme cylindrique et de longueur généralement grande,
- charges à supporter généralement importantes,
- nécessité de dégager en permanence un gabarit suffisant pour assurer la desserte du chantier de part et d'autre de l'atelier de bétonnage,
- organisation du travail par cycles continus et répétitifs.

On peut distinguer dans les coffrages de souterrain trois parties principales.

- **la surface coffrante**, désignée sous le nom de peau ou d'habillage, qui matérialise l'intrados du revêtement. Elle assure la qualité du fini de l'ouvrage à la fois sur le plan aspect et confort usuel de l'utilisateur et sur le plan techni-

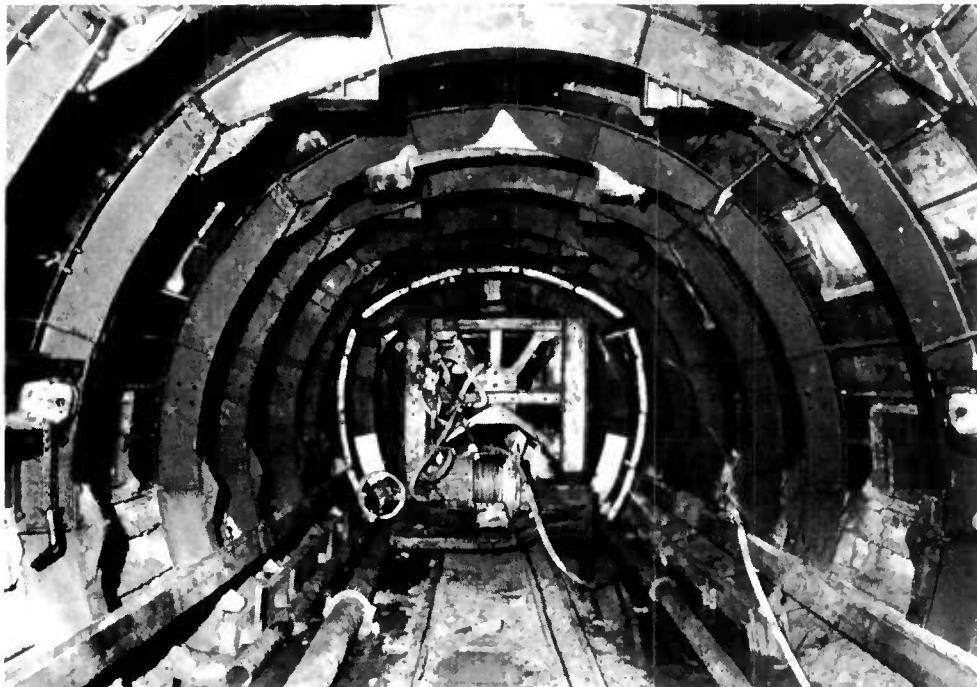


Figure 20. Galerie technique sous Fourvière - Lyon. Elément de coffrage en cours de transfert sous un autre élément en position coffrante.

que comme support éventuel de l'étanchéité intrados, sur le plan économique pour l'éclairage et le nettoyage, dans le cas des tunnels routiers.

Le matériau utilisé pour réaliser l'habillage des coffrages peut être de l'acier, un alliage léger, du bois ou des matières plastiques d'un uni équivalent au moins à celui du bois contreplaqué.

- l'**ossature**, constituée de profilés métalliques cintrés, est l'élément porteur du coffrage. Elle en assure la stabilité dimensionnelle et par là même garantit le respect du gabarit projeté, l'absence de mouvements importants en cours de bétonnage évitant des conséquences fâcheuses sur la qualité de l'anneau de béton.
- le **mécanisme de manutention** qui permet le décoffrage, le transport et la remise en place du coffrage.

Les coffrages comprennent également un certain nombre de dispositifs annexes tels que les appuis, les masques d'arrêt, les fenêtres de vibrations, les pipes de bétonnage.

Il existe de nombreux types de coffrages qui diffèrent :

- par leur degré d'industrialisation (manutentions manuelles ou mécaniques),
- par la nature des matériaux qui les composent (acier, alliages légers, bois, plastiques),
- par la fraction de la section de revêtement qu'ils permettent de coffrer en une phase (voûte, piédroits ou radier). La totalité de la section peut d'ailleurs être revêtue en une seule phase dans le cas des petites et moyennes sections circulaires.

4.3.2. Coffrages industrialisés (coffrages outils)

Les coffrages industrialisés sont caractérisés par la présence d'un système de manutention mécanique. Ils sont utilisés lorsque l'opération de coffrage présente un caractère répétitif et systématique, c'est-à-dire lorsque le nombre de réemplois est important, par exemple une cinquantaine. Le nombre de réemplois est lié à la longueur de l'ouvrage, à la longueur des coffrages et à la cadence de bétonnage imposée par le planning qui permet de déterminer le nombre de coffrages nécessaires.

Parmi les coffrages industrialisés, on distingue deux catégories, selon que les organes assurant la fonction de rigidité et la fonction de manutention sont dissociés ou non.

4.3.2.1. Coffrages articulés à manutention par portique

La manutention est assurée par un portique mobile distinct de l'ossature du coffrage. Un seul portique peut ainsi assurer successivement la manœuvre et le transport de plusieurs tronçons juxtaposés. Le portique peut être ou non motorisé. En général, il circule sur rails.

L'ossature est articulée pour se rétracter pendant le décoffrage et le transport. Elle est généralement conçue de façon à pouvoir circuler, en position repliée, à l'intérieur des autres éléments de coffrages en position de travail. Il s'agit alors de coffrage dit télescopable. Les mouvements de repliement et de déploiement de l'ossature sont généralement commandés par des vérins hydrauliques.

Lorsqu'il s'agit de coffrages télescopables, on utilise plusieurs tronçons de coffrage juxtaposés, la manœuvre consistant à reprendre le tronçon arrière pour le placer en position avant.

La longueur et le nombre des tronçons dépendent de la cadence d'avancement et du délai de décoffrage.

L'utilisation de coffrages télescopables convient pratiquement à tous les modes de bétonnage du revêtement, qu'il s'agisse de bétonnage plot par plot avec coffrage d'arrêt ou de bétonnage continu, que le revêtement soit exécuté en fin de chantier ou au fur et à mesure du creusement. L'emploi en est par contre difficile dans les galeries de petite section (inférieure à 10 m² fini) en raison de l'encombrement des portiques de manutention.

4.3.2. Coffrages articulés autoporteurs

Dans ce type de coffrage, chaque tronçon comporte son propre dispositif de manutention, qui est confondu avec l'ossature. Il en résulte, en principe, une simplification des opérations de décoffrage et transport. Par contre, le « télescopage » des tronçons les uns par rapport aux autres est impossible. On utilise généralement un seul tronçon dont le cycle de réemploi s'étend sur plusieurs jours si le planning le permet, ou deux tronçons opérant en alternance par plots impairs pour l'un et plots pairs pour l'autre.

Ce type de coffrage doit être également retenu lorsque la section de la galerie est trop faible pour permettre l'adoption des portiques indépendants.

*

**

Les coffrages articulés, qu'ils soient à portiques ou autoporteurs, peuvent être conçus :

- soit pour coffrer l'ensemble de la section de la galerie, notamment lorsque celle-ci est circulaire,
- soit plus généralement pour équiper plusieurs chantiers successifs : radier, piédroits et voûte.

Dans tous les cas, la voie de manutention du coffrage doit pouvoir être établie de façon suffisamment stable avec suffisamment de précision pour assurer le réglage correct du coffrage en position coffrante et le blocage de ses pieds.

4.3.3. Coffrages par éléments (coffrages manuels)

Les coffrages par éléments sont caractérisés par le fait que l'ossature et la peau sont dissociables en éléments de dimensions suffisamment faibles pour ne pas nécessiter de dispositifs de manutention.



Figure 21. Autoroute A. 8. - Tunnel du Col de l'Arme.

Lors de chaque cycle d'utilisation, les coffrages sont démontés et reconstruits à l'emplacement de la surface à bétonner. Ils sont, en principe, utilisés dans le cas où le nombre de réemplois n'est pas suffisant pour justifier l'investissement correspondant à un coffrage industrialisé, ou en complément de celui-ci pour des ouvrages dont la forme est différente de celle de la section courante.

Les différentes sortes de coffrages par éléments se distinguent essentiellement par la nature des matériaux dont ils sont constitués.

4.3.3.1. Coffrages métalliques

Dans le cas de coffrages métalliques, on utilise généralement une peau constituée d'éléments de dimensions standardisées et assemblés au moyen de dispositifs simples et facilement réutilisables (boulons ou clavettes). La dimension des éléments est généralement inférieure au mètre carré. Il peut s'agir de plaques en acier ou de couchis en alliage léger, ces derniers permettant, en raison même de leur légèreté, l'utilisation d'éléments de plus grandes dimensions, sous forme de planches rectangulaires de faible largeur dont la plus grande dimension est disposée longitudinalement par rapport à la galerie.

L'ossature, également métallique, est constituée de pièces manipulables à la main et assemblées par boulons ou clavettes.

4.3.3.2. Coffrages bois et coffrages mixtes

L'ossature est formée de vaux en bois qui peuvent être assemblés par boulons. L'habillage est réalisé à l'aide de panneaux en planches ou en contreplaqué préparés en atelier.

Dans le cas de coffrages destinés à un seul emploi ou à un très petit nombre de réemplois, on est amené à concevoir des coffrages « sur mesure » fabriqués intégralement sur place en s'affranchissant, au moins partiellement, des sujétions de démontage et remontage.

Enfin, on peut également utiliser des coffrages mixtes comportant, soit une ossature métallique et un habillage bois, soit plus rarement, une ossature bois et une peau métallique.

4.3.4. Dispositions complémentaires

Quel que soit leur type, les coffrages de souterrain doivent comporter certains dispositifs imposés par les conditions même du bétonnage en galerie.

4.3.4.1. Dispositifs d'appuis

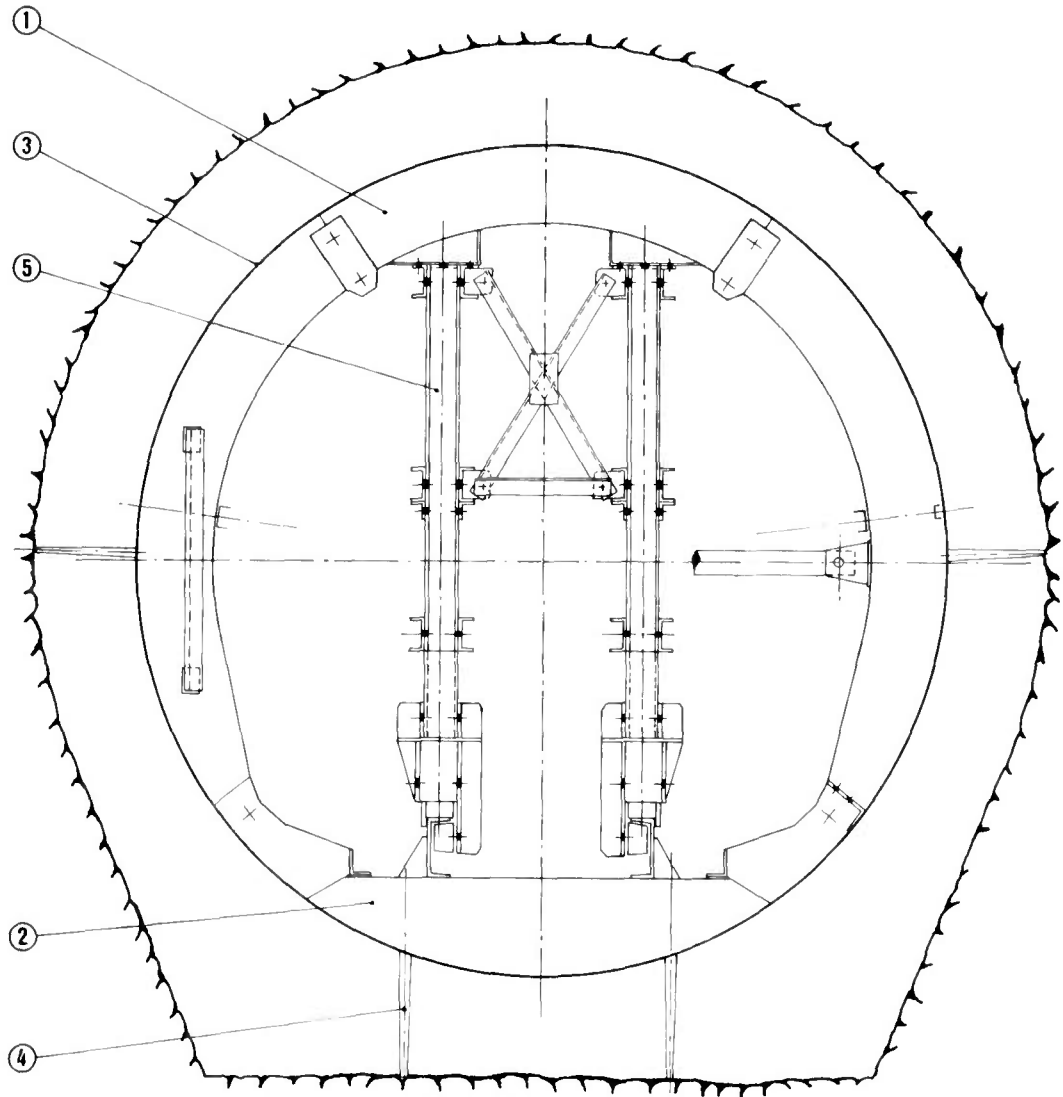
Les dispositifs d'appuis sont destinés à reprendre les efforts verticaux et horizontaux dus au poids du coffrage et aux poussées du béton frais.

Il faut distinguer le cas particulier du bétonnage d'un anneau complet en une seule phase des autres cas (anneaux non fermés ou anneaux bétonnés en plusieurs phases). Dans le premier, on utilise un coffrage généralement circulaire dont les appuis sont réalisés par des crayons calés au terrain (figure 22).

Dans les autres cas, le positionnement des coffrages est généralement réalisé à partir d'appuis sur vérin et des broches d'ancrages qui sont calés sur une phase de bétonnage préalable, celle-ci étant ou non intégrée au revêtement définitif (figures 23 et 24).

Dans les petites galeries, les effets dus aux poussées horizontales peuvent être repris par butonnage.

Quel que soit le cas de figure, le dimensionnement de ces appuis doit faire l'objet d'une note de calcul spécifique. Il faut alors considérer tous les cas d'utilisation du coffrage : chargement dissymétrique au passage d'un croisement de galeries ou d'une niche de sécurité, hauteur de béton différente dans chaque piédroit, poussée verticale de bas en haut en début de bétonnage, par exemple. Par ailleurs, le calage topographique doit être vérifié avec une précision conforme aux spécifications du C.C.T.P.



- | | |
|---------------------|-------------------------|
| ① Cintre de voute | ④ Crayons |
| ② Cintre de radier | ⑤ Portique de transport |
| ③ Surface coffrante | |

Figure n° 22. Coffrage type Circulaire, Auto-Porteur, sur « Crayons » (d'après documentation CER-COMAT - Compagnie d'Etudes et de Réalisation de Coffrages et de Matériels).

Figure 23. Tunnel de Buswiller - SNCF -
Détail du pied de coffrage sur la longrine
d'appui.

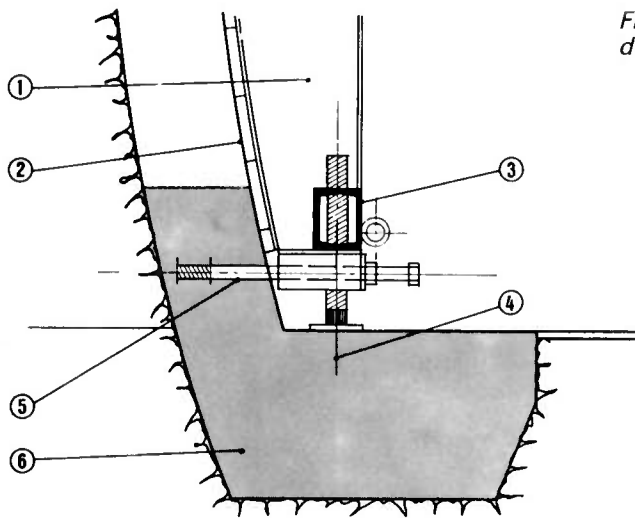
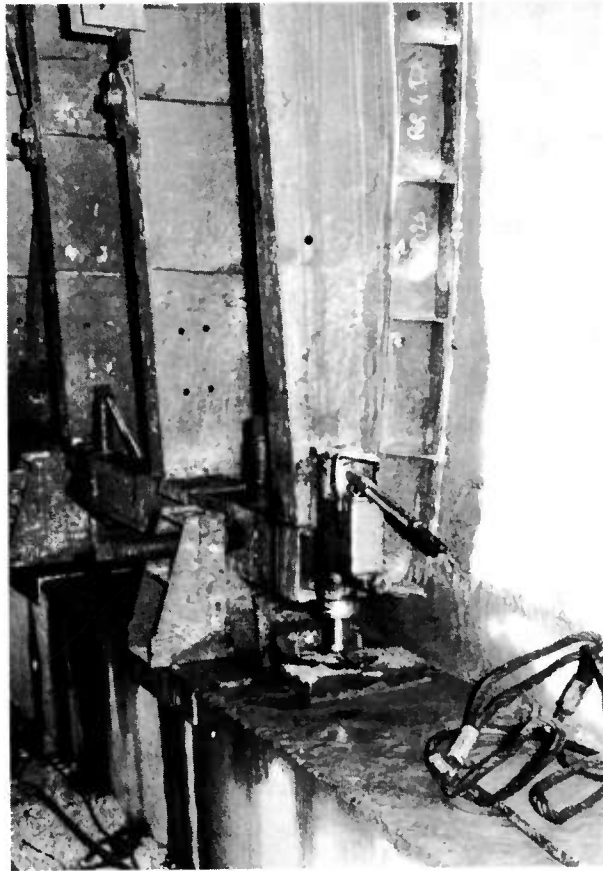


Figure 24. Croquis d'un type de dispositif
d'appui de pied de coffrage.

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| ① Cintre de voute | ④ Verin d'appuis |
| ② Couchis | ⑤ Broche d'ancrage |
| ③ Barre de repartition | ⑥ Beton 1 ^{re} phase |

4.3.4.2. Coffrages d'arrêt ou masques

Il s'agit du coffrage transversal permettant l'arrêt du bétonnage à la fin de chaque plot. Le masque peut être métallique ou constitué de panneaux de bois butés contre les montants métalliques fixés aux vaux (figure 25). Selon les caractéristiques du coffrage, le masque peut présenter des volets amovibles permettant le remplissage et le clavage en voûte.

Si le projet prévoit la réalisation d'une étanchéité intrados, le masque peut comprendre le coffrage de la réservation pour le joint d'étanchéité transversal (voir chapitre VI).



Figure 25. Tunnel de Buswiller - SNCF - Coffrages d'arrêt ou masque.

4.3.4.3. Coffrages de reprise

Lorsque le revêtement est coulé en plusieurs phases, il peut être nécessaire de coffrer la surface de reprise à la jonction de la phase suivante. C'est le cas lorsque le radier est coulé avant les piédroits. Le coffrage de la surface de reprise fait alors partie intégrante du coffrage de la phase correspondante et il est déplacé en même temps que celui-ci. Si le revêtement est armé, le coffrage doit être conçu de façon à permettre le passage des armatures en attente sans nuire à son étanchéité. Dans ce cas, il faut désolidariser le coffrage de reprise qui est alors réalisé par éléments de préférence en bois.

Comme pour les masques, les coffrages de reprise peuvent comprendre le coffrage de réservations nécessaires à la pose de joints d'étanchéité.

4.3.4.4. Fenêtres

Des ouvertures doivent être ménagées à intervalles réguliers suivant une maille de l'ordre de 3 m dans la peau du coffrage afin d'assurer le remplissage correct du volume à bétonner et d'introduire les vibreurs internes.

Les fenêtres sont ensuite obturées au moyen de panneaux de même nature que la peau du coffrage et assemblées au moyen de clavettes.

4.3.4.5. Pipes de bétonnage

Le remplissage des coffrages était généralement réalisé par introduction du tuyau de bétonnage dans les fenêtres ou à travers le masque d'arrêt.

De plus en plus fréquemment, les coffrages comprennent des pipes auxquelles sont raccordés directement les tuyaux de bétonnage. Outre la réduction des manipulations de tuyauteries dans des conditions difficiles voire dangereuses, ces dispositions permettent un meilleur clavage du béton en clé de voûte (figure 26).

4.3.5. Conception et réception des coffrages

Sur le plan contractuel, les spécifications du marché concernant les coffrages portent :

- sur le gabarit à respecter avec les tolérances admises (pour les tunnels routiers de plus de 10 m de diamètre, on pourra admettre une tolérance de ± 5 cm qui tient compte des erreurs d'implantation et des déformations du coffrage),
- sur les qualités de la surface (rugosité, décrochements) qui peuvent être exigées par les conditions d'exploitation,
- sur les réservations éventuelles.

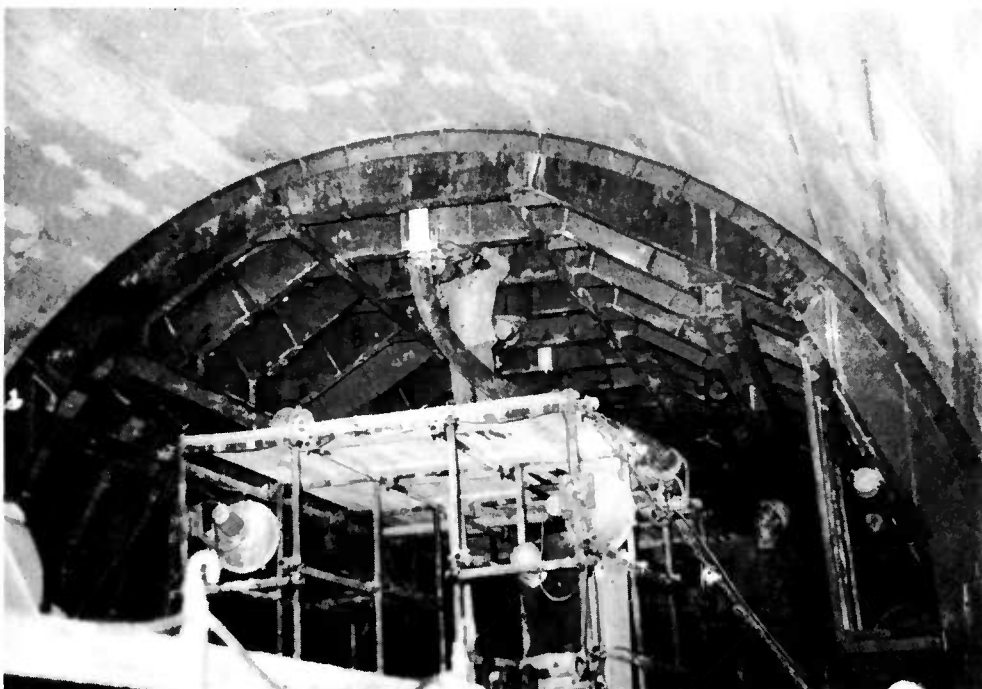


Figure 26. Tunnel de Buswiller - SNCF - Pipe de bétonnage.

Les coffrages étant considérés comme un moyen d'exécution de l'entrepreneur, leur conception est l'affaire de celui-ci.

Toutefois, compte tenu du rôle capital de cet outil pour la qualité finale de l'ouvrage, les documents d'études qui conduisent à sa conception et à sa mise en œuvre doivent être soumis au visa du Maître d'Œuvre. Attendre les épreuves de convenance pour réceptionner les coffrages conduit fréquemment à des difficultés techniques donc à des délais et des coûts supplémentaires.

Après consultation des différents intervenants (maîtres d'œuvre, entreprises générales, fabricants de coffrage), il est apparu que le cheminement qui conduit à la réception d'un coffrage pourrait être le suivant :

- à partir des documents contractuels et des conditions de chantier imposés par le programme de bétonnage, l'entreprise établit une lettre de commande suivant, par exemple, le modèle donné en annexe. Ce document est communiqué au maître d'œuvre.
- le fabricant de coffrage établit le projet de coffrage (plans et notes de calcul) qui doit être visé par le maître d'œuvre avant tout commencement d'exécution. Les efforts à reprendre au niveau des appuis doivent être clairement explicités.
- après fabrication, transport des pièces et montage sur le site, les coffrages sont réceptionnés.

Le fabricant doit fournir en même temps une note sur les conditions de bon emploi et d'entretien du coffrage qu'il a conçu et réalisé.

Les épreuves de convenance peuvent alors commencer.

Compte tenu des délais d'études, de fabrication, de montage, il faut prévoir de commencer à étudier les coffrages au minimum 6 à 8 mois avant ces essais de convenance.

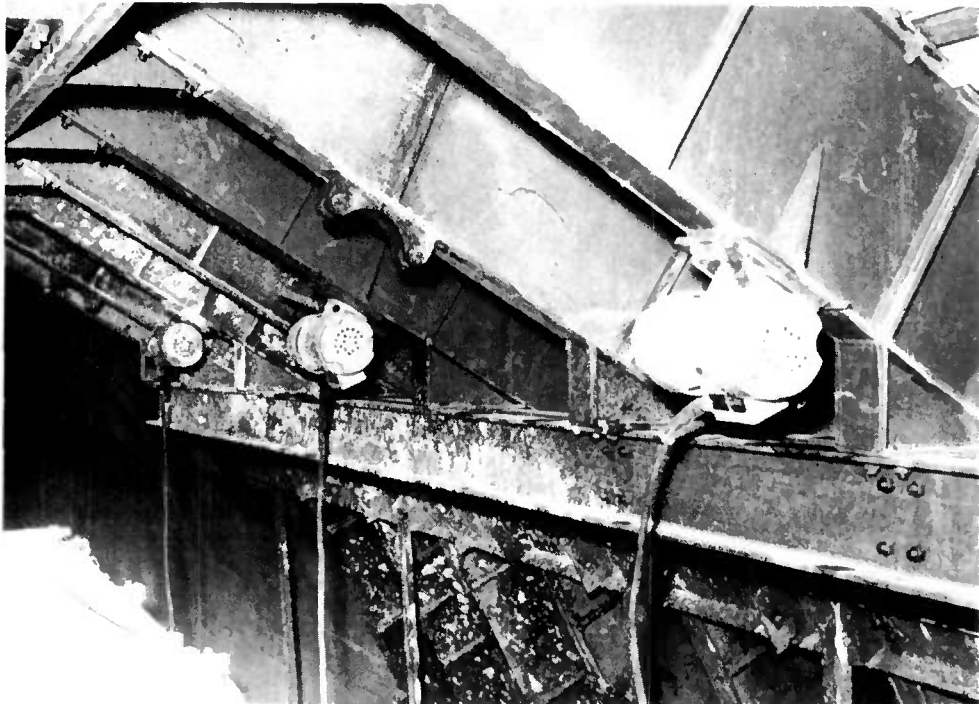


Figure 27. Tunnel de Buswiller - SNCF - Vibreurs de coffrage.

4.4. LA VIBRATION

Le rôle de la vibration du béton frais est le remplissage correct des coffrages et le serrage du béton.

La mise en place du béton de revêtement de tunnel est réalisée de façon complémentaire par vibration interne et par vibration du coffrage (figure 27).

En matière de vibration, il n'existe pas de règles absolues. Il s'agit de faire appel à la compétence des spécialistes qui travaillent en relation avec les fabricants de coffrage. Ils déterminent le nombre et le mode de fixation des vibreurs, leur fréquence et leur puissance en fonction des épaisseurs de béton, de la cadence de bétonnage, de la structure du coffrage, etc.

Toutefois, il existe quelques points qui se retrouvent dans tous les cas de figures :

- **La vibration interne doit être prévue dans tous les cas.** Toutefois, il faut savoir qu'elle ne peut être appliquée que dans des conditions très difficiles dans certaines parties de l'anneau en cours de bétonnage : extrémité du plot bétonné, zones proches de la clé de voûte.
- La vibration externe a un rayon d'action limitée de 30 à 40 cm.
- Les vibreurs de coffrages doivent être fixés sur des parties résistantes et stables afin que le maximum de l'énergie de vibration soit transmise au béton.
- La vibration externe doit être mise en œuvre au fur et à mesure de l'avancement du talus de béton dans le coffrage pendant des courtes périodes, assez fréquentes. Ces différents éléments (fréquence et durée des séquences de vibration, déplacement des vibreurs) doivent être précisés dans le programme de bétonnage.

Le contrôle de l'efficacité de la vibration est réalisé par carottage en place sur toute l'épaisseur de béton. On détermine la densité du béton durci sur carottes et on la met en relation avec la distance à la paroi où la vibration doit être la plus efficace.



Figure 28. Autoroute A. 40 - Tunnel de Vuache, tube Nord - Tête Ouest.

CHAPITRE 5

LE REVETEMENT ET L'ETANCHEMENT

Nous ne reviendrons pas sur le rôle de l'eau en travaux souterrains qui a déjà été traité aux paragraphes 1.2.2 et 1.2.3. ci-dessus, qu'il s'agisse :

- du béton frais (augmentation de la teneur en eau),
- du béton durci (eaux agressives, riches de gel),
- de l'exploitation (appareillages électriques, dégradation de la chaussée, risque de verglas).

Dans ce chapitre, il n'est traité de l'étanchement des ouvrages souterrains que dans la mesure où la recherche des résultats d'étanchement entraîne des obligations particulières pour la réalisation du revêtement en béton coffré de l'ouvrage.

Pour l'étude particulière des problèmes d'étanchéité, on se reportera aux recommandations du groupe de travail « Etanchéité » de l'AFTES publiées dans la revue Tunnels et Ouvrages Souterrains n° 35 - Septembre - Octobre 1979 et n° 36 - Novembre - Décembre 1979.

5.1. ETANCHEMENT PAR LE REVETEMENT COFFRE

Le béton est un matériau qui serait en général suffisamment étanche dans sa masse (K de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-11} m/s) pour éviter les venues d'eau en tunnel.

Le revêtement en béton perd cette propriété par ses discontinuités qui sont de deux types (K devient de l'ordre de 10^{-8} m/s).

5.1.1. *Discontinuités systématiques*

Ce sont les discontinuités de la structure du revêtement, qui résultent directement du phasage de la mise en œuvre de celui-ci, plus généralement appelées joints. On peut distinguer deux types de joints :

- **les joints de reprise longitudinaux**, au niveau des discontinuités entre phases de bétonnage (joints voûte - piédroits, joints piédroits - radier...) qui n'ont pas en général à supporter des variations dimensionnelles importantes (sauf dans les galeries hydrauliques à fortes pressions intérieures)
- **les joints entre anneaux**, au niveau des discontinuités entre anneaux successifs de bétonnage. Il s'agit généralement de joints transversaux qui ont à supporter des variations dimensionnelles (retrait hydraulique et variation de température).

Les joints posent deux types de problèmes :

- **discontinuité de la structure** : il est parfois nécessaire et toujours souhaitable de recréer la continuité de la structure au niveau des reprises longitudinales (repiquage, collage, injections, voire ferrailage de reprise),
- **étanchéité** : on se reportera aux recommandations de l'AFTES sur l'étanchéité des ouvrages en souterrains pour ce qui concerne le traitement des joints, soit joints de drainage, soit en joints d'étanchéité. Dans tous les cas,

la prévision d'un tel traitement impose la mise en œuvre systématique d'une réservation au moment du bétonnage.

Pour le traitement en joint d'étanchéité et/ou en joint de drainage, la réservation théoriquement nécessaire se compose d'une réservation en profondeur destinée à loger les organes de drainage (fond de joint) et éventuellement le produit d'étanchéité en bande. Pour des raisons pratiques, les réservations actuellement réalisées sont des réservations dissymétriques uniquement en profondeur (figure 29).

Il est toujours économique d'effectuer les réservations en cours de bétonnage. Les dimensions données ci-dessous peuvent être revues en fonction du problème précis et du type de produit d'étanchéité retenu.

5.1.2. Discontinuités non systématiques

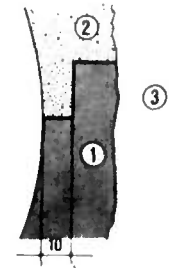
Ces discontinuités sont imprévisibles dans leur importance et dans leurs localisations. Elles résultent généralement :

Exemple de traitement de joint de reprise longitudinal

Joint voûte-piedroits avec piedroits réalisés en premier

La mise en œuvre en 2^e phase du béton de voûte étant en général favorable au bon clivage du joint, il n'est alors pas nécessaire d'injecter celui-ci sauf en cas de venues d'eau.

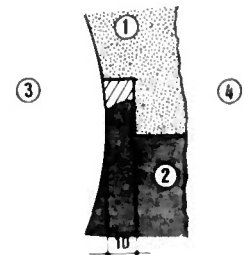
- ① Béton de piedroits
- ② Béton de voûte
- ③ Terrain



Joint voûte-piedroits avec voûte réalisée en premier

Le béton de piedroits est volontairement arrêté à mi-chemin de la réservation dans le béton de voûte. Le béton matté, collé suffit alors à assurer un bon clivage et une bonne étanchéité.

- ① Béton de voûte
- ② Béton de piedroits
- ③ Béton malte colle
- ④ Terrain



Exemple de réservation d'un joint entre anneaux

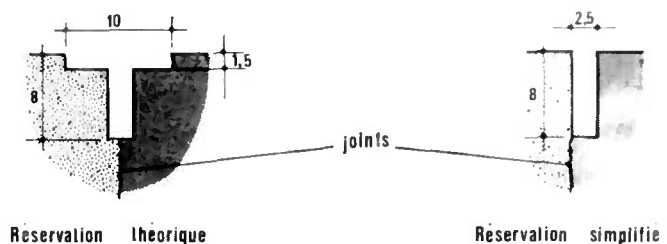


Figure 29. Exemples de réservation pour joints d'étanchéité.

- d'arrêts intempestifs en cours de bétonnage créant des joints de reprise,
- d'une fissuration du revêtement.

Il convient de les limiter le plus possible, en ce qui concerne les arrêts en cours de bétonnage par exemple en prévoyant des moyens en cas de défaillance des matériels de fabrication et de mise en place du béton, en ce qui concerne la formulation du béton, en limitant la longueur des plots, et surtout en évitant de brusques variations de température et d'hygrométrie. Ces aspects ont été abordés dans les chapitres précédents. Le problème de la reprise de ces discontinuités est abordé au paragraphe 5.4. ci-dessous.

5.2. *PREDRAINAGE*

Il consiste en la mise en œuvre d'organes de drainage à l'extrados du revêtement avant mise en place de celui-ci. Ce prédrainage permet le captage des venues d'eau concentrées (par demi-coquilles et/ou tubes plastiques...) et le traitement des venues d'eau diffuses (mise en œuvre sommaire d'une feuille plastique : polyane, P.V.C...). Le prédrainage ne suffit jamais à assurer à lui seul la fonction étanchement de l'ouvrage. En particulier, les organes de prédrainage ne sont pas accessibles après mise en œuvre du revêtement et n'ont donc qu'une durée de fonctionnement limitée.

Leur rôle essentiel est d'éviter l'augmentation de la teneur en eau du béton frais et la mise en place de l'étanchéité dans des conditions plus favorables.

5.3. *ETANCHEITE EXTRADOS*

La mise en œuvre d'une couche d'étanchéité constituée d'une feuille plastique mise en place à l'extrados du revêtement permet de mettre intégralement hors d'eau le béton (les galeries hydrauliques ne sont pas concernées). Elle est donc certainement la plus satisfaisante pour assurer la durabilité du revêtement. Elle influe sur la conception et la réalisation de celui-ci (figure 30).



Figure 30. Autoroute A 40 - Tunnel de Vuache - Etanchéité extrados.

5.3.1. *Fissuration du béton*

L'étanchéité extradoss empêchant l'arrivée de l'eau au contact du béton de revêtement, il sera possible d'être moins strict sur les paramètres qui conduisent à une réduction de la fissuration. Par exemple, on pourra admettre une longueur de plot plus importante.

Par ailleurs, des constatations faites sur des tunnels récents tendraient à montrer que la fissuration est réduite dans les zones étanchées de cette façon (et peut être aussi moins visible parce qu'elle n'est pas soulignée par des traces d'humidité). Cette limitation de la fissuration pourrait s'expliquer par la teneur en eau du béton frais qui est bien maîtrisée et par certaine désolidarisation entre la structure et le terrain créée par la mise en place de la couche d'étanchéité facilitant des mouvements relatifs de faible amplitude.

5.3.2. *Dimensionnement*

Si l'étanchéité est totale, c'est-à-dire s'il n'y a pas reprise de l'eau en base de piedroit et évacuation longitudinale dans le tunnel, il y a une mise en charge de la structure dont son dimensionnement doit tenir compte. Cette hypothèse doit être conservée même si on admet un certain débit de fuite mais qui est trop faible pour réduire la charge d'eau.

5.3.3. *Planning*

D'une manière générale, c'est l'atelier d'étanchéité qui doit s'accommoder des contraintes de planning imposées par l'avancement du chantier et les cadences de bétonnage.

Ces conditions doivent être clairement exposées à l'entreprise d'étanchéité (entreprise spécialisée sous-traitante) qui doit en tenir compte pour ses approvisionnements, pour l'établissement de ses cadences et de ses prix.

5.3.4. *Mise en œuvre*

La conception du complexe d'étanchéité doit permettre de s'accommoder d'une mise en œuvre normale du béton. Des précautions restent à prendre au niveau de la mise en place des masques et des ferraillements éventuels pour éviter toute déchirure des feuilles.

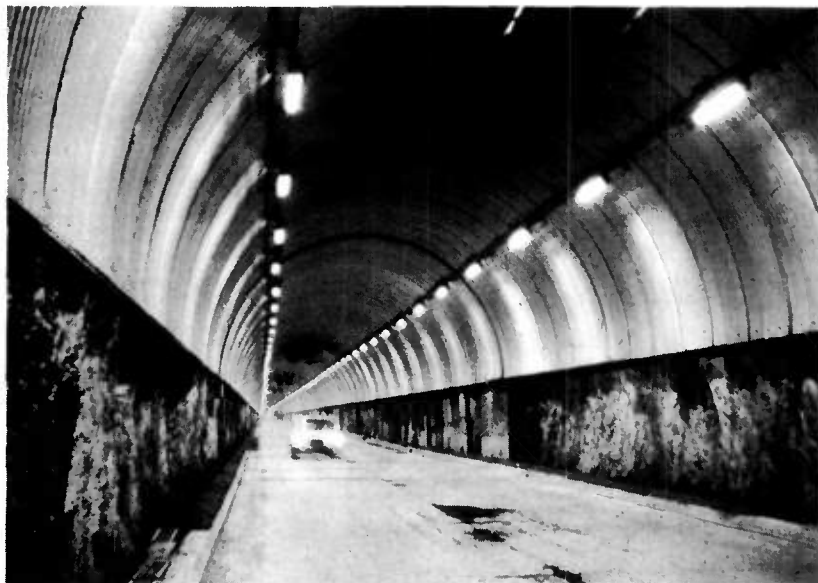


Figure 31. Tunnel du Chat - Chambéry - Etanchement par tôles « parapluie ».

5.3.5. *Injections de remplissage*

Actuellement, les tunnels où a été mise en œuvre une étanchéité extradados n'ont pas fait l'objet d'injections de remplissage. S'il apparaît souhaitable, en cours de travaux d'en ménager la possibilité, il convient de prévoir des réservations de trous d'injection spécialement équipés, afin de ne pas avoir à perforer la feuille. L'injection de remplissage est alors réalisée entre béton et complexe d'étanchéité, ce qui doit conduire à augmenter dans certains cas les caractéristiques d'allongement demandées au produit d'étanchéité.

5.4. **ETANCHEITE INTRADOS**

Un système d'étanchéité intrados comporte d'une part un complexe d'étanchéité (film mince à base de résines) mis en œuvre sur l'intrados de la surface de revêtement, d'autre part le traitement d'étanchéité de l'ensemble des joints (joints de construction ou discontinuités). C'est la technique la plus couramment utilisée lorsqu'il s'agit d'étancher un tunnel dont le revêtement est déjà en place.

5.4.1. Du fait de la localisation de l'étanchéité, le revêtement doit supporter les sujétions résultant de la présence de l'eau. La plus importante est la sujétion de pression. En général, on demande au complexe d'étanchéité d'avoir une adhérence minimale de 0,1 à 0,3 MPa sur le béton, ce qui implique que le béton doit lui-même pouvoir résister à des tractions de cet ordre sur sa surface d'intrados. Dans certains cas, les valeurs demandées peuvent être plus élevées. Par ailleurs, contrairement au cas de l'étanchéité extradados, le béton doit être étudié pour résister à l'agressivité de l'eau et au gel.

5.4.2. Du fait de la mise en œuvre d'un film mince à base de résine, le revêtement doit supporter un deuxième type de sujétions qui dépend très étroitement de la nature du ou des produits utilisés. D'une manière générale, le béton doit être exempt de laitance et de produits de démoulage (pour certains produits, l'utilisation d'huile de décoffrage au silicose doit être proscrite) ; les défauts de surface s'ils sont importants, doivent être repris avec des enduits compatibles avec le système d'étanchéité prévu.

5.4.3. La géométrie des réservations de joints a été décrite au paragraphe 5.1.1. du présent chapitre. Il convient simplement de noter que la dimension précise des réservations doit être arrêtée en fonction des sollicitations prévues pour le joint (pression, jeu longitudinal et transversal, gel...) en accord avec l'applicateur d'étanchéité.

5.4.4. L'interpénétration très étroite entre ce type d'étanchéité d'intrados et les spécifications à imposer à son support (le béton de revêtement) impliquent qu'une attention particulière soit apportée à l'aspect contractuel de la répartition des tâches et donc des responsabilités. On se reportera, en ce domaine, aux recommandations de l'A.F.T.E.S. citées en début de ce chapitre.

5.5. **AUTRES MODES D'ETANCHEMENT**

Dans le cas des réparations et rénovations d'ouvrages, d'autres modes d'étanchement pour tunnels revêtus peuvent être utilisés. Nous citerons simplement, pour mémoire, les injections (surtout utilisées en réparation) et la réalisation de voûtes parapluies en indépendance à l'intrados du revêtement (figure 31).

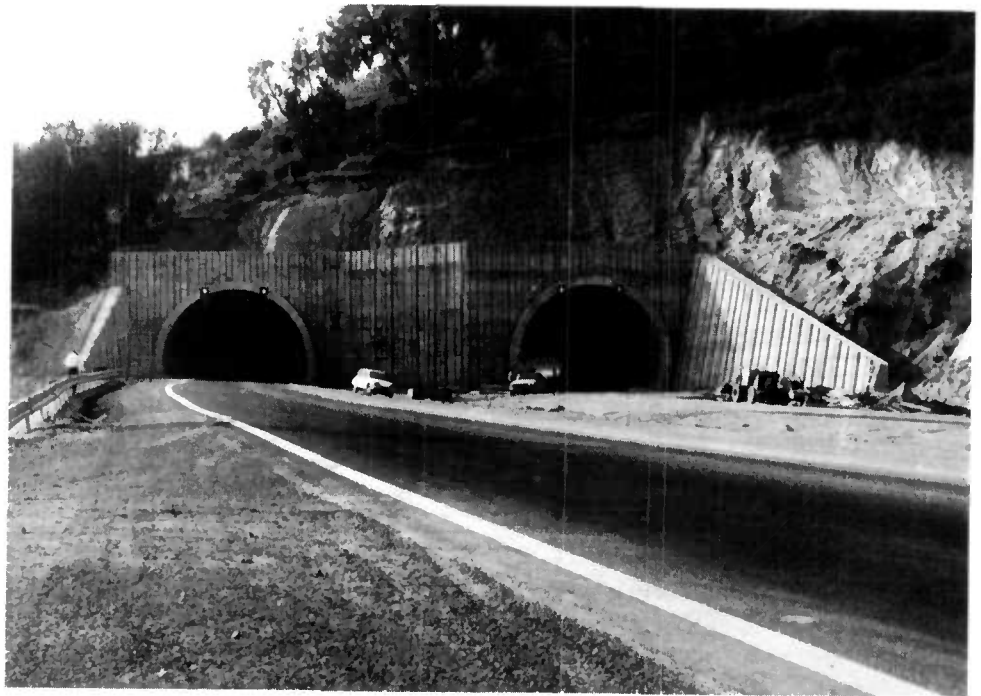


Figure 32. Autoroute A 8 - Tunnel de Sainte-Lucie - Têtes Est.

CHAPITRE 6

LA PRATIQUE DU BETONNAGE

Après avoir passé en revue les questions liées à l'étude et au contrôle du béton comme matériau, décrit les matériels utilisés pour le bétonnage en souterrain et les différents types d'étanchement, il convient d'examiner l'opération de bétonnage elle-même.

Les recommandations figurant dans ce chapitre tiennent plus aux règles de l'art qu'à des clauses contractuelles figurant au marché. Il est clair que leur liste ne peut être exhaustive et que chaque cas particulier apporte une expérience nouvelle aux différents intervenants.

6.1. PROGRAMME DE BETONNAGE

L'établissement d'un programme de bétonnage s'impose pour les travaux en souterrain. Il doit être soumis au visa du Maître d'Œuvre préalablement à toute commande de matériel et reprendre dans le détail les opérations liées au bétonnage depuis la réception des granulats et du ciment jusqu'au décoffrage de l'anneau bétonné et à la réalisation des injections de remplissage.

Le programme de bétonnage concerne donc :

- le matériel de fabrication et, entre autres, l'indication de la précision des dosages, de la capacité de production, de la durée de malaxage, etc.,
- le matériel de transport : ses capacités, la durée de transport dont l'importance et les conséquences peuvent être très variables d'une saison à l'autre et suivant l'avancement du chantier,
- le matériel de mise en place avec les cadences de bétonnage,
- les solutions de remplacement en cas de défaillances de l'un des matériels visés ci-dessus,
- les coffrages avec les cycles de mise en place et de déplacement,
- la durée de coffrage en fonction des conditions de température et d'hygrométrie dans le tunnel,
- les contrôles avec leur nature et leur fréquence.

A ce programme, est jointe une note sur les conditions de réalisation des injections de remplissage décrites dans le paragraphe 6.4. ci-après.

Enfin, l'insertion du programme de bétonnage dans le programme général des travaux doit être examinée avec attention en particulier si la desserte des autres ateliers nécessite un transit important sous le coffrage. En pratique, ces transports ne peuvent être autorisés qu'en dehors des phases de bétonnage, de transport et de mise en place du coffrage. L'application stricte des consignes de sécurité pendant ces phases est incompatible avec un transport de déblais ou de matériaux de chaussée, par exemple.

6.2. AVANT LE BETONNAGE

Toute opération de bétonnage doit être précédée de la réception du support.

Cette réception concerne :

- le respect de la géométrie prévue par les plans du marché. Il s'agit en fait de vérifier que le volume limité par le terrain ou les soutènements, permettra de réaliser un anneau dont l'épaisseur minimale sera celle prévue au projet,
- la purge et le nettoyage du support (rocher, béton projeté, cintres...),
- la collecte des venues d'eau ponctuelles ou diffuses.

Si le projet prévoit la réalisation d'une étanchéité extradoss par feuille, celle-ci doit être réceptionnée selon des prescriptions figurant au marché.

Préalablement ou parallèlement à ces opérations, selon le planning des travaux, sont réalisés les appuis et/ou les chemins de déplacement du coffrage de voûte. L'implantation de ces parties d'ouvrages, même si elles sont provisoires, doit être réalisée avec précision pour pouvoir respecter les tolérances géométriques imposées par le marché.

Les dernières opérations avant le bétonnage concernent les coffrages :

- vérification de l'état de la peau du coffrage : propreté, régularité, étanchéité des joints ;
- transport, mise en place et calage des coffrages ;
- confection des masques et de leur étanchéité ;
- vérification de l'état de marche des vibreurs.

Le dernier point à examiner avant le bétonnage concerne les conditions météorologiques qu'il convient de vérifier auprès de la station la plus proche 24 heures à l'avance.

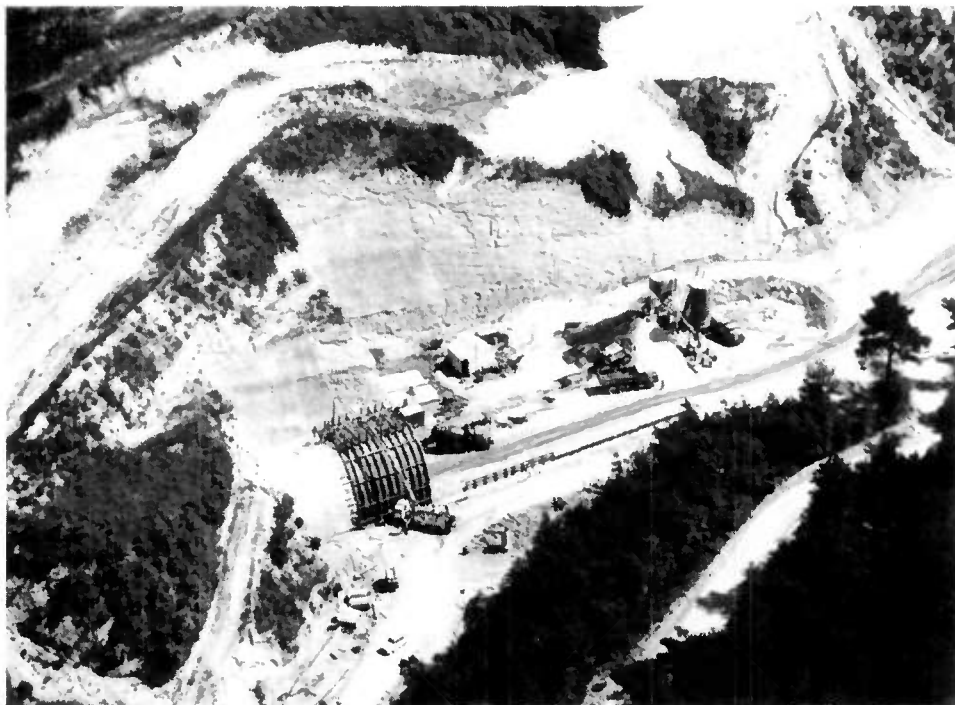


Figure 33. Autoroute A. 8. - Tunnel de Pessicart - Bétonnage de la casquette du tube Nord - Tête Ouest.

Selon les informations fournies, les précautions à prendre porteront :

- sur les installations de fabrication du béton et en particulier sur le stockage de granulats. Dans des conditions particulièrement rudes, en montagne par exemple, on peut être amené à réchauffer le béton ;
- sur le transport du béton, surtout en cas de durée de transport importante et de température élevée ;
- sur les conditions de température, d'hygrométrie, de vitesse de l'air sur les lieux même du bétonnage.

Ce dernier point intéresse particulièrement les tunnels de grande section dont le percement a lieu avant le bétonnage. L'exemple type est celui des tunnels routiers ou autoroutiers réalisés durant la dernière décennie.

Les conditions d'environnement locales ont un rôle fondamental sur le comportement des bétons jeunes, c'est-à-dire au moment du décoffrage et au cours de leur vieillissement. En particulier, les laboratoires de recherches ont bien montré l'influence de la vitesse de l'air sur les retraits hydrauliques et donc sur la fissuration du béton aux jeunes âges, ce facteur étant largement prépondérant par rapport aux ajustements de formulation (dosage en eau, en fines, adjuvant).

Il est souvent nécessaire de fermer la section du tunnel (bâches, ballots de paille) afin d'y conserver une atmosphère aussi favorable que possible au vieillissement du béton.

6.3. EN COURS DE BETONNAGE

Certaines opérations à effectuer par l'entrepreneur et le laboratoire de contrôle ne sont pas particulières aux travaux en souterrain. Il s'agit :

- de vérifier la régularité de l'approvisionnement et la durée du transport,
- éventuellement, de faire intervenir les moyens de secours. Le point fondamental qu'il faut toujours avoir à l'esprit est que tout arrêt de bétonnage se traduira par une reprise apparente sur le parement qu'il sera pratiquement impossible de traiter,
- de réaliser les contrôles sur béton frais et les éprouvettes pour le contrôle sur béton durci.

Les points spécifiques qui doivent retenir toute l'attention des différents intervenants concernent :

- la vitesse de montée du béton dans les coffrages qui ne doit pas dépasser celle prise en compte pour la conception du coffrage. La vitesse maximale normalement admise par les constructeurs est de 2 m/heure,
- le décalage de niveau du béton entre chaque piédroit, autre paramètre pris en compte dans le calcul des coffrages. D'une manière générale, cet écart de niveau doit rester inférieur à 2 m. Le passage des singularités localisées telles que hors profil important, niche de sécurité, croisement de galeries doit être particulièrement suivi,
- la vibration qui doit être mise en œuvre dans les conditions prévues au programme de bétonnage,
- la qualité du clavage en fin de bétonnage, qu'il s'agisse d'un plot réalisé en sous-œuvre ou de la voûte elle-même. A la différence des travaux à l'air libre où la face supérieure est libre, le béton de galeries doit être serré avec une certaine pression entre le coffrage et le terrain ou une partie bétonnée antérieurement afin de remplir tout le volume disponible. En général, les constructeurs tiennent compte d'une pression de 0,2 MPa pour le calcul des coffrages. Les vides pouvant subsister sont comblés par des injections de remplissage, comme indiqué dans le paragraphe suivant.

Dans le cas du bétonnage en sous-œuvre, la liaison longitudinale entre les deux parties du revêtement (voûte et piédroit, par exemple) est parfaite par un joint maté comme on l'a déjà vu au paragraphe 5.1.1. ci-dessus.

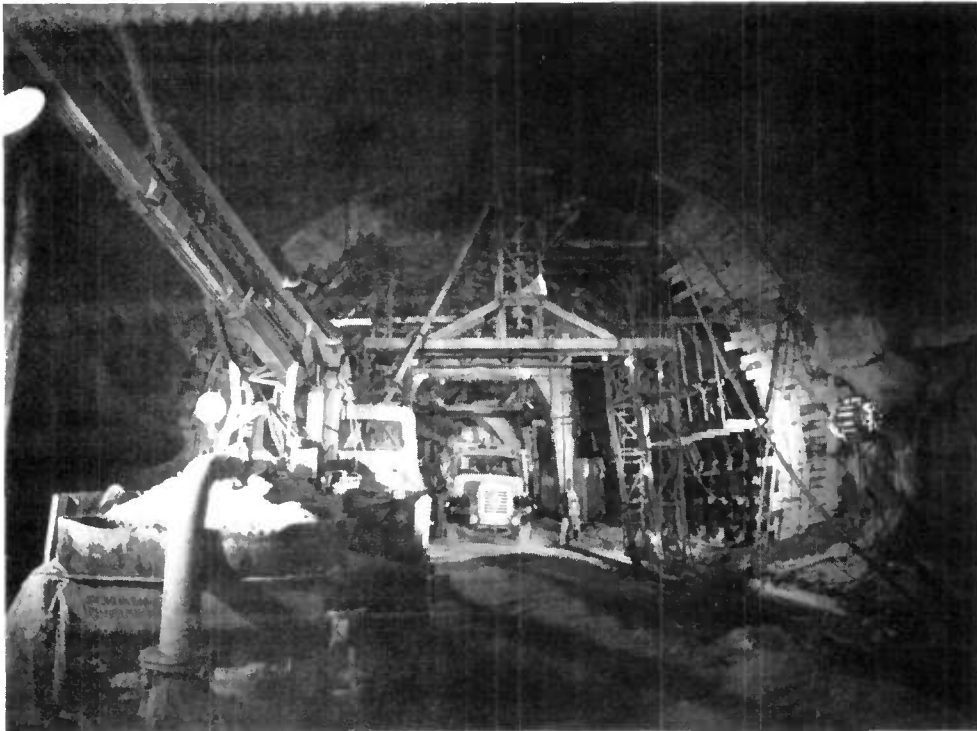


Figure 34. Autoroute A. 8. - Tunnel de Las Planas.

6.4. APRES LE BETONNAGE

La durée de coffrage est déterminée par des essais d'information. D'une manière générale, elle est comprise entre 18 et 48 heures. Bien que son incidence sur l'économie du chantier soit importante il n'y a jamais intérêt à décoffrer trop rapidement vis-à-vis de la qualité globale du revêtement.

Malgré l'utilisation des techniques modernes de bétonnage, on ne peut être assuré que le clavage en clé de voûte a été parfaitement réalisé. Des forages de contrôle avec examen endoscopique éventuel peuvent être entrepris pour le vérifier en prenant les précautions nécessaires pour ne pas porter atteinte à l'étanchéité extradados.

Les vides subsistants sont comblés par des injections de remplissage à base d'un mortier dont le ciment est de même nature que celui utilisé pour le revêtement. En général, les trous d'injection sont répartis sur trois génératrices de la voûte : la clé et deux lignes symétriques.

La figure 35 donne un schéma de répartition des trous d'injection pour un tunnel de 10 m de diamètre. Les pressions d'injection restent faibles (0,3 MPa doit être considéré comme un maximum), car il s'agit simplement de remplir les vides.

La composition d'un mortier d'injection est établie en fonction du volume des vides à remplir et de la résistance à la compression requise.

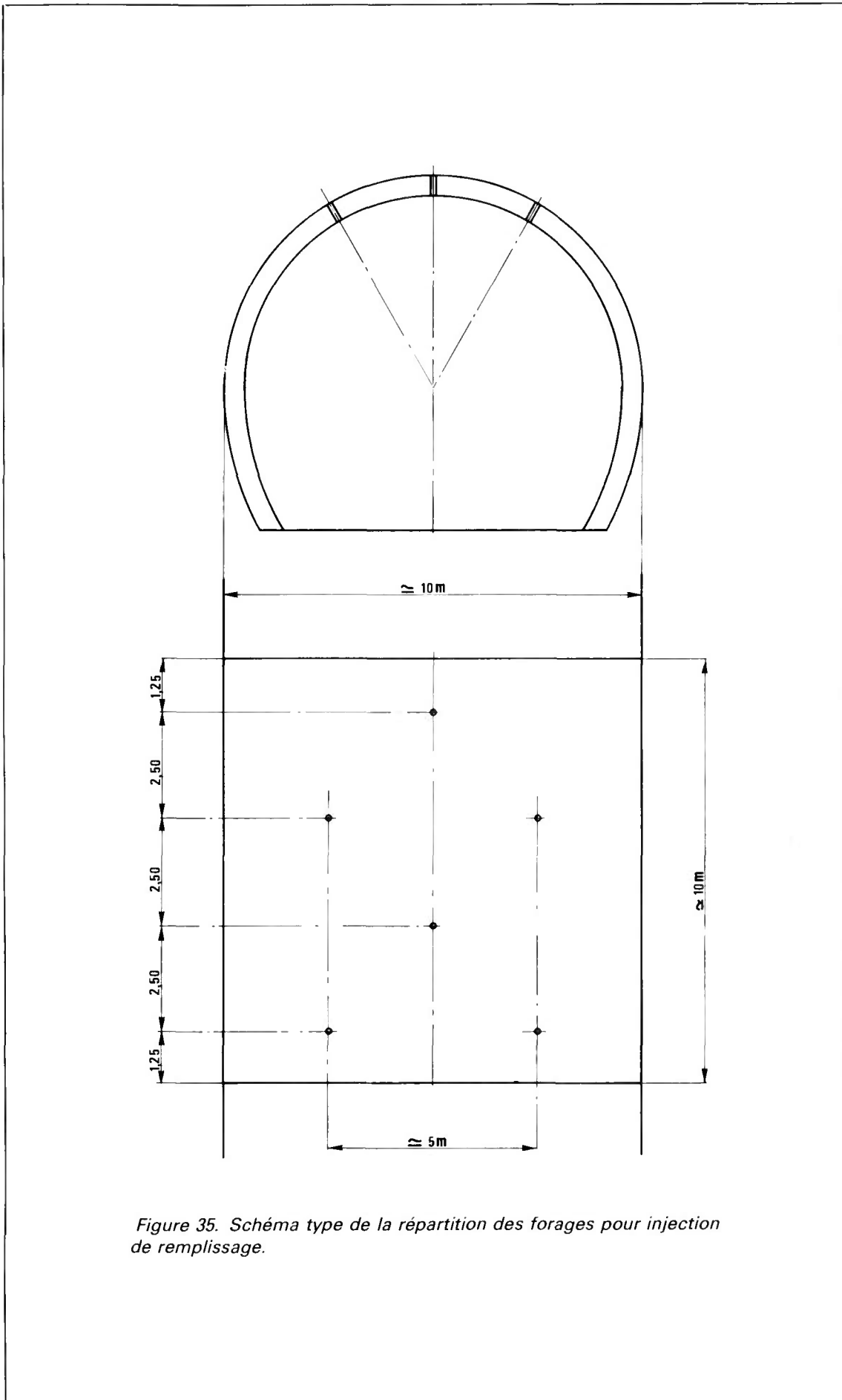


Figure 35. Schéma type de la répartition des forages pour injection de remplissage.

A titre d'exemple, on pourra retenir la composition suivante facile à mémoriser :

- 100 kg de sable 0 - 2
- 100 kg de ciment
- 100 l d'eau
- 2 kg de bentonite

Le mortier obtenu aura une résistance à la compression supérieure à 7 MPa à 7 jours.

Si les volumes à injecter sont faibles, il est possible d'injecter un coulis dont la composition conservera un rapport pondéral C/E (ciment/eau) voisin de 1.

Dans certains cas particuliers, il peut être nécessaire de parfaire la liaison terrain – revêtement et d'assurer un léger traitement du terrain encaissant, par des injections de collage et de serrage. Par rapport aux injections de remplissage, la pression sera plus élevée et le coulis plus fluide.

Lorsque l'on a, a priori, un bon clavage (creusement au tunnelier, par exemple), on peut faire une combinaison des opérations de remplissage, de collage et de serrage en perforant des trous d'injection qui pénètrent de 0,50 m à 1,00 m dans le rocher et en plaçant l'obturateur dans l'épaisseur du revêtement, le coulis étant assez fluide et la pression limitée à 0,3 MPa.

Pour toutes ces injections, on se reportera utilement aux recommandations concernant les travaux d'injections pour les ouvrages souterrains publiées par l'A.F.T.E.S. dans la revue Tunnels et Ouvrages Souterrains n° 10 Juillet - Août 1975.

Il faut noter que l'exécution de ces injections nécessite beaucoup de soin et un contrôle par le Maître d'Œuvre. Les cadences de cette phase de travaux peuvent être inférieures à celles de la réalisation du revêtement. Le nombre d'ateliers d'injection doit être étudié en fonction du programme général.



Figure 36. Galerie technique sous Fourvière - Lyon. Train pour injection de remplissage.

6.5. SECURITE

La Circulaire n° 82.40 du 23 avril 1982 relative aux obligations s'imposant aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre en matière d'hygiène et de sécurité rappelle l'ensemble des textes qui concerne ce sujet pour les travaux de bâtiment et de génie civil et les conditions dans lesquelles ils s'appliquent. Pour ce qui concerne la réalisation du revêtement des tunnels, en dehors de la justification des dispositions constructives et des moyens utilisés, le Plan d'Hygiène et de Sécurité (P.H.S.) réglera la circulation en galerie, qu'il s'agisse des piétons, des engins de transport du béton ou des engins devant circuler à travers l'atelier de bétonnage.

Une des autres causes les plus importantes d'accidents en chantier souterrain concerne les chutes de hauteur. Le coffrage et le matériel utilisés pour les injections (portique, engin de levage) comporteront tous les dispositifs de protection nécessaires pour assurer la sécurité du personnel contre ce risque.

Pour ces deux problèmes de sécurité particuliers, on se reportera utilement aux fiches de sécurité établies par l'O.P.B.T.P. (Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics) et citées dans l'annexe bibliographique ci-dessous.

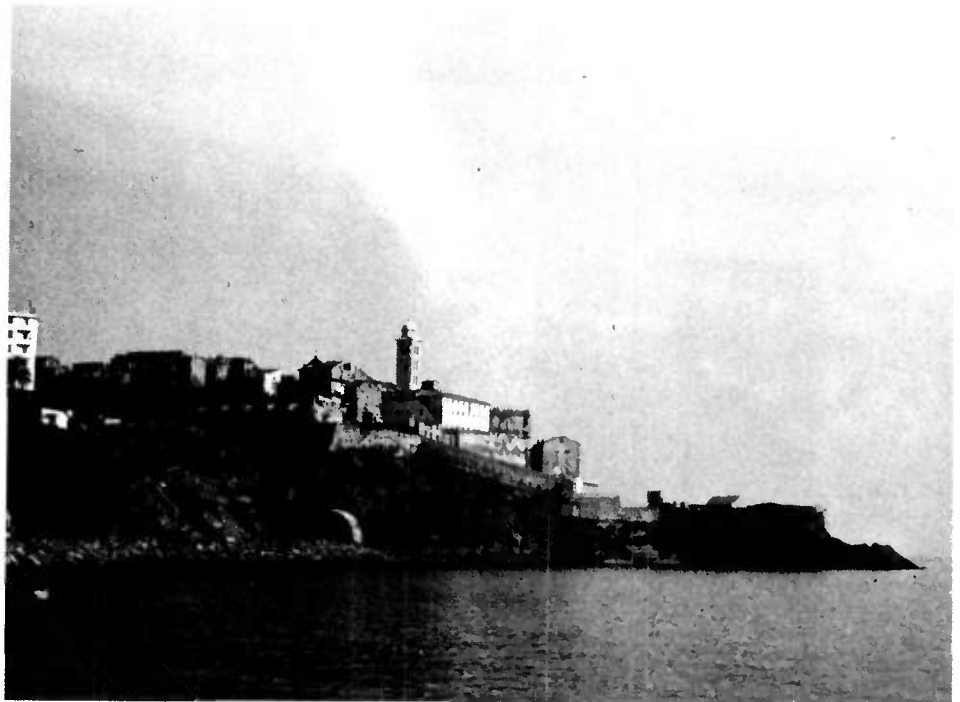


Figure 37. Tunnel sous la Citadelle - Bastia.

CHAPITRE 7

SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DU REVETEMENT

L'Instruction Technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979 publiée par le Ministère des Transports - Direction des Routes et de la Circulation Routière, définit les modalités et les principes d'intervention du gestionnaire d'ouvrages d'art.

Pour ce qui concerne les tunnels, on se reportera aux documents suivants qui font partie de l'Instruction Technique :

- 1^{re} Partie - Dispositions applicables à tous les ouvrages.
- 2^e Partie - Fascicule 01 - Dossier d'ouvrages et Fascicule 40 - Tunnels - Tranchées couvertes - Galeries de protection.

Les fascicules 02 - Généralités sur la surveillance, 03 - Mesures de sécurité - Auscultation - Surveillance renforcée - Haute surveillance, 04 - Surveillance topométrique sont à paraître.

De son côté, la S.N.C.F. a publié la consigne générale SNCF. EF 9 D n° 4 du 15 septembre 1974 pour les ouvrages qui la concernent.

Par ailleurs, dans le cadre de l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) Groupe de Travail n° 14 - Entretien et réparation des ouvrages souterrains, les brochures suivantes ont été publiées :

- Nomenclature des parties d'ouvrages en tunnels, donnant une définition codifiée des principaux termes descriptifs spécifiques aux ouvrages souterrains.
- Catalogue des défauts apparents des tunnels.
- Méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus.

Le représentant du maître d'ouvrage responsable de la gestion d'un tunnel trouvera dans ces documents tous les éléments pour conduire son action en particulier vis-à-vis du revêtement.

Toutefois, on ne saurait trop insister sur le rôle fondamental de la surveillance visuelle très régulière effectuée par le personnel d'exploitation dont les observations doivent être reportées systématiquement dans le dossier d'ouvrage (mise à jour du levé de l'intrados).

Avant de remettre le tunnel au gestionnaire, le maître d'œuvre chargé de la construction doit mener un certain nombre d'opérations dans le but de faciliter, voire d'orienter l'exploitation.

Dans tous les cas, le maître d'œuvre doit constituer les parties du dossier d'ouvrages qui le concernent, c'est-à-dire :

- Le sous-dossier 1 - Conception, Construction, Histoire.
Pour ce qui est du revêtement, ce dossier doit reprendre :
 - sa géométrie (forme, épaisseur) et les notes de calcul justificatives s'il y a lieu,

- la nature de ses constituants,
- les conditions de sa mise en œuvre sans omettre les incidents,
- le résultat des différents contrôles,
- la nature des injections et les quantités mises en œuvre par zones.

— Le sous-dossier 2 - Etat de référence.

Ce dossier doit comprendre le levé de l'intrados établi par des agents spécialisés, où sont notamment reportées les fissures.

Pour les tunnels routiers, le C.E.Tu. a été équipé d'une centrale d'inspection spécialement conçue pour réaliser ce travail. La S.N.C.F. possède des matériels équivalents pour les tunnels ferroviaires.

La constitution précise de ces dossiers est détaillée dans les fascicules 01 et 40 visés ci-dessus.

Par ailleurs, dans les cas particuliers où, lors de la construction, on craint un chargement différé du revêtement, il est nécessaire de mettre en place des dispositifs d'auscultation permanents qui permettent de vérifier son comportement.

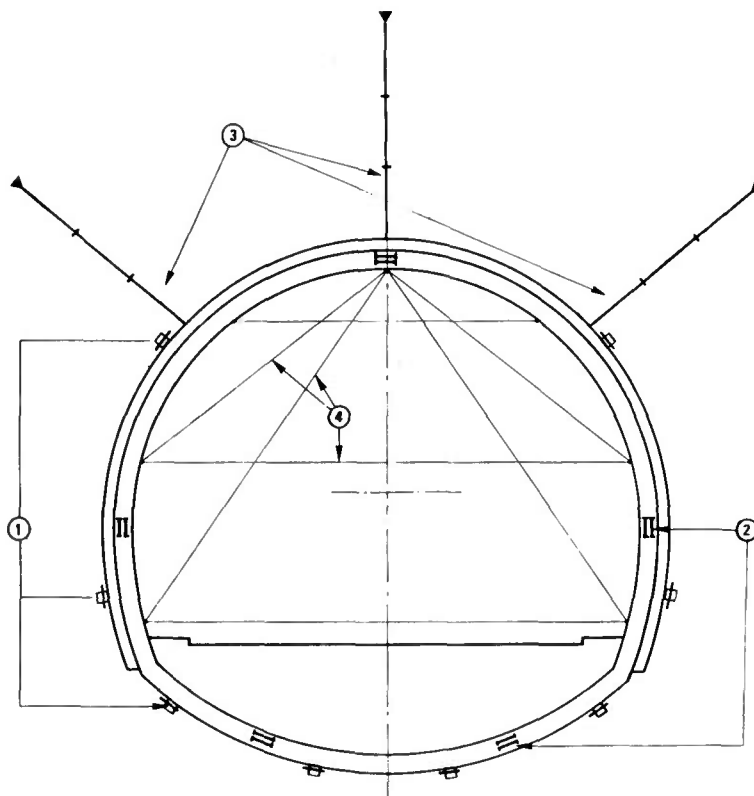


Figure 38. Autoroute A. 8. - Tunnel de la Baume.

Ces dispositifs sont, pour les sections courantes, basés sur des mesures de déplacements et plus particulièrement sur des mesures de convergence relative entre plots fixes scellés à l'intrados. Les mesures de convergence ont une précision de l'ordre du dixième de millimètre. Leur interprétation doit notamment tenir compte du retrait hygrométrique et de l'évolution des températures du béton qui sont souvent rapides la première année, ainsi que des variations saisonnières.

Dans le cas de désordres ayant conduit à des fractures du béton, il est peut-être nécessaire d'en suivre localement l'évolution par des fissuromètres.

Une analyse plus poussée du comportement du revêtement nécessite l'établissement de sections de mesures qui comportent selon les cas, outre les mesures de convergence relative de l'intrados, un repérage absolu des déplacements d'un plot, des mesures de déplacements à l'intérieur du terrain encaissant par des extensomètres à longue base, des mesures de déformation à l'intérieur du béton par extensomètres à corde vibrante (figure 39).



- ① Mesure de pression Cellules GLÖTZL
- ② Mesure de contraintes Extensomètres à cordes vibrantes
- ③ Convergence absolue Extensomètres à 3 capteurs
- ④ Convergence relative

Figure 39 Autoroute A.40 - Tunnel de Chamoise. Section de mesures primaires.

Pour la détermination des contraintes exercées par le terrain sur le revêtement, on utilise divers procédés :

- soit des mesures directes de pression totale au contact béton - terrain ou perpendiculairement à la fibre moyenne du revêtement ;
- soit des mesures par extensomètres à témoins sonores placés dans le béton ;
- soit ultérieurement des mesures de contraintes par libération dans une saignée sciée à partir de l'intrados.

Chacun de ces procédés a ses difficultés, tous ont le défaut de ne donner qu'une valeur locale. Leur choix dépend du contexte.

La transformation en contrainte des mesures réalisées par extensomètre nécessite de bonnes corrections de température, la connaissance du retrait du béton et de la variation de son module d'élasticité avec l'âge.

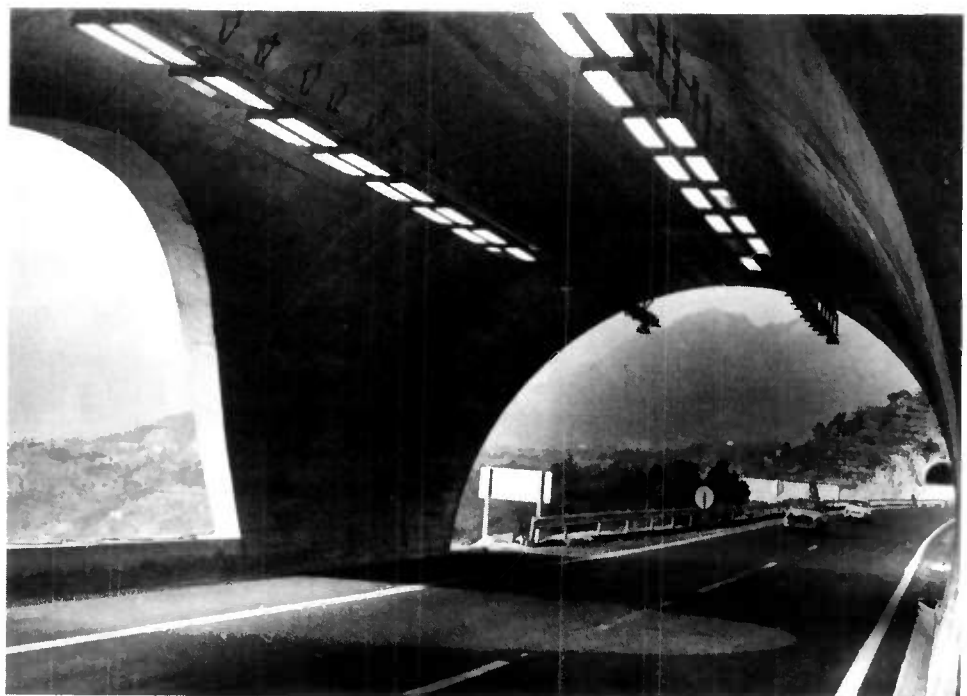


Figure 40. Autoroute A 8 - Tunnel de la Girarde.

CONCLUSION

Le revêtement définitif des tunnels et galeries est réalisé dans la grande majorité des cas en **béton coffré**.

Cette solution est actuellement le meilleur compromis technique et économique pour la construction et l'exploitation de ces ouvrages.

Le caractère particulier de la réalisation du revêtement des tunnels tient :

- à la nature du béton qui, d'une manière générale, n'est pas armé,
- à l'espace confiné que le béton doit remplir complètement en étant mis légèrement en pression,
- à la géométrie de ce volume. D'une part, l'épaisseur du revêtement peut varier très rapidement d'un point à l'autre suivant l'importance des hors profils. D'autre part, cette épaisseur est faible vis-à-vis des autres dimensions d'un plot. Dans les tunnels routiers, l'épaisseur est couramment de l'ordre de 0,40 m pour une surface coffrée de 250 m²,
- à l'agressivité du milieu dans lequel est mis en place le revêtement, qu'il s'agisse de la nature des eaux de contact ou des variations brutales de température et d'hygrométrie dans les tunnels où la ventilation peut être importante.

En conséquence, outre le respect des caractéristiques mécaniques exigées pour assurer la stabilité à long terme de l'ouvrage, on doit s'attacher, lors de l'étude et de la mise en place d'un béton de revêtement de tunnel :

- à optimiser la **maniabilité du béton frais** pour qu'il remplisse tout le volume compris entre le terrain ou le soutènement et le coffrage,
- à augmenter la **compacité du béton durci** afin qu'il puisse d'autant mieux résister à l'agressivité du milieu ambiant,
- à rechercher pour les mêmes raisons tous les facteurs qui permettront de **réduire la fissuration**.

La recherche de ces diverses qualités impose des études élaborées, une fabrication du type industriel, c'est-à-dire aussi régulière que possible et l'établissement d'un programme de bétonnage précis afin d'éviter toute improvisation sur le chantier.

Par ailleurs, surtout pour les ouvrages de grandes dimensions, le coffrage des voûtes est un outil très particulier qu'il n'est pas toujours facile de maîtriser s'il est mal conçu ou mal utilisé. Même s'il n'est considéré que comme un moyen de l'entreprise, sa conception et sa mise en œuvre doivent retenir toute l'attention du maître d'œuvre.

Enfin, le comportement dans le temps du revêtement, tout au long de l'exploitation de l'ouvrage, doit être surveillé avec attention. Toutes modifications de ce comportement doivent être répertoriées et corrigées si elles prennent de l'importance. Les réparations des revêtements de tunnels sont toujours coûteuses, délicates à mettre en œuvre, d'autant qu'on n'a accès qu'à une seule face de l'anneau.

Ainsi, le bétonnage du revêtement des tunnels, qui est trop souvent considéré par les mineurs comme la phase la moins « glorieuse » par rapport au creusement, doit faire l'objet d'études précises où aucun paramètre ne doit être négligé. Du niveau de ces études dépend la qualité de l'ouvrage telle que la perçoivent le service d'exploitation et les usagers.

ANNEXE AU CHAPITRE 4

COFFRAGES

QUESTIONNAIRE ET PRECONISATIONS POUR L'ETUDE D'UN COFFRAGE DE TUNNEL

1. — **FORME ET DIMENSIONS DE SECTION
RESUMÉES EN GÉNÉRAL SUR UNE COUPE TRANSVERSALE -**
Plans n°
(à fournir avec le présent questionnaire)
 - **Préconisations résultant du marché**
 - a) tolérance de positionnement :
 - b) tolérances des déformations :
2. — **LONGUEUR DE L'OUVRAGE A REVETIR**
 - Longueur totale :
3. — **TRACE EN PLAN ET PROFIL EN LONG DE L'OUVRAGE**
(plans n°)
 - a) rayons et longueur des courbes éventuelles :
 - b) pente et dévers :
 - c) accès pour amener le matériel à pied d'œuvre :
 - d) galerie à ciel ouvert ou souterrain :
 - e) nombre d'attaques de bétonnage :
4. — **TYPE DE COFFRAGE**
 - a) télescopique :
 - b) non télescopique :
 - c) charpente incorporée :
5. — **CADENCE JOURNALIERE D'AVANCEMENT**
 - a) nombre de postes de travail quotidien :
 - b) temps de coffrage imposé :
6. — **BETONNAGE**
 - a) discontinu avec arrêt de bétonnage à définir
 - b) engins de mise en œuvre des bétons :
 - c) cadence de bétonnage en m³/heure :
 - d) temps de prise du béton :
 - e) bétonnage :
 - par tapis
 - par lance noyée :
 - par pipe intérieure coffrage :
 - par benne à ciel ouvert :
 - f) pression de clavage à considérer :
 - g) talus :

7. – PHASES D'EXECUTION

- 1) *Pleine section*
 - a) coffrages de banquettes avec, ou sans caniveaux :
 - b) coffrage de voûte :
- 2) *Coulée en deux ou plusieurs phases :*
 - a) voûte :
 - b) piédroits :
 - c) radier ou banquette :
- 3) *Sur crayons*

8. – AMENAGEMENTS COMPLEMENTAIRES SUR COFFRAGE

- a) nombre de fenêtres :
- b) gabarit de passage :
- c) vibration :
- d) pipes de bétonnage :
- e) motorisation :
- f) pièces additionnelles pour courbes (courbure constante ou réglable)
 - type d'alèses
 - nombre à fournir
 - nombre de réemplois de ces alèses
- g) réservation et fixation des armatures
- h) autres aménagements

9. – MASQUES

- a) supports métalliques réglables : (masque en planche ou grillage)
- b) masque métallique :
- c) joints « Waterstop » ou autres :
- d) tenons de cisaillement :
- e) réservations pour joints : (type de réservation)
- f) autres aménagements :
 - Définition des joints

10. – MODE DE FIXATION DU COFFRAGE EN PIED

- Principe :

11. – CREUSEMENT EN TUNNEL

- a) terminé avant début de bétonnage ou non :
- b) gabarit de passage éventuel :
- c) ventilation (sections), dans le cas de creusement simultané :

12. – QUANTITE DE COFFRAGES A FOURNIR

- a) voûte :
- b) piédroits :
- c) radier :
- d) masques :
- e) banquette :

13. – NOMBRE DE REEMPLOIS DES COFFRAGES

14. – COUT ESTIME D'AMORTISSEMENT COFFRAGES

15. – DATE SOUHAITEE DE REMISE D'OFFRE

Importante à connaître pour l'Entreprise et le concepteur des coffrages.

16. — **DATE DE DECISION DE COMMANDE**

(commande des coffrages, 5 à 6 mois avant les premiers bétonnages)

17. — **RESPONSABLE DE LA PRISE DE DECISION**

18. — **DATE DE FOURNITURE DU MATERIEL**

a) livraison chantier :

b) mise en œuvre béton :

— **Préconisations**

a) délai de fourniture : 2 mois 1/2 à 3 mois minimum après acceptation des plans de principe.

b) délai de montage et mise en œuvre des coffrages : 4 à 6 semaines minimum.

19. — **OBSERVATIONS OU REMARQUES COMPLEMENTAIRES**

— aménagements particuliers sur portique du coffrage pour équipements divers (signalisation si un trafic important est prévu sans le coffrage, par exemple).

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie sommaire présentée ci-dessous ne prétend pas reprendre l'ensemble des publications qui concernent le béton en général et le revêtement des souterrains en particulier.

La sélection a été faite à partir des deux critères suivants :

- les documents cités ont été utilisés pour la rédaction du guide ;
- ces documents sont disponibles au Service de Documentation du Centre d'Etudes des Tunnels du Ministère des Transports.

Pour obtenir une liste complémentaire ou une bibliographie sur un sujet précis, les lecteurs peuvent s'adresser à ce même service de documentation.

DOCUMENTS GENERAUX

- Le béton, J. FAURY.
Dunod, 1950.
- Les fissures du ciment (causes et remèdes), A. JOISEL.
Editions STAR, Paris, 1961.
- La durabilité du béton, Al. STEOPOE.
Eyrolles, 1970.
- Adjuvants et traitements des mortiers et bétons, M. VENUAT.
C.E.R.I.L.H., Paris, 1971.
- La pratique des ciments et des bétons, M. VENUAT.
Editions du Moniteur, 1976.
- Formwork, The Concrete Society (Londres).
Concrete Society Technical Report n° 13 / Mars 1977.
- La fabrication du béton, P. CORMON.
Eyrolles, 1977.
- Nouveau guide du béton, G. DREUX.
Eyrolles, 1979.
- Formwork for Concrete, M.K. HURD.
American Concrete Institute, Detroit, 1979.
- Colloque international sur le béton jeune, E.N.P.C. - RILEM, Paris, avril 1982.
Editions Anciens E.N.P.C., 1982.
- Les essais de granulats, C. TOURENO et A. DENIS.
Rapport de recherche LPC N° 114, juillet 1982.

TEXTES OFFICIELS

- Fascicules interministériels applicables aux marchés publics de travaux de génie civil : CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales) et anciens CPC (Cahier des Prescriptions Communes)
 - fascicule 4, titre I : « Aciers pour béton armé »
numéro spécial 73-81 bis du Bulletin Officiel du Ministère des Travaux Publics
 - fascicule 65 : « Exécution des ouvrages et constructions en béton armé »
numéro spécial 69-15 ter du Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement et du Logement
 - fascicule 69 : « Travaux en souterrain »
numéro spécial 82-25 bis du Bulletin Officiel du Ministère des Transports.
- Circulaire n° 44 du 18 juillet 1967 relative à l'utilisation des liants hydrauliques dans les ouvrages exposés à l'action d'eaux à haute teneur en sulfate.
N° 67-14, texte 454 du Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement et du Logement.
- Circulaire n° 79-23 du 9 mars 1979 relative au contrôle de la qualité des bétons.
N° 79-10 bis du Bulletin Officiel du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- Circulaire n° 82-40 du 23 avril 1982 relative aux obligations s'imposant aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre en matière d'hygiène et de sécurité.
N° 82-21, texte 593, du Bulletin Officiel du Ministère de l'Urbanisme et du Logement, du Ministère des Transports, et du Ministère de l'Environnement.
- Circulaire n° 82-56 du 17 juin 1982 relative à l'inscription d'aptitude des centrales de béton prêt à l'emploi utilisées dans le cadre des marchés publics de travaux.
N° 82-26 bis du Bulletin Officiel du Ministère de l'Urbanisme et du Logement, du Ministère des Transports, et du Ministère de l'Environnement.
- Instruction technique du 19 octobre 1979 pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.
 - **1^{re} Partie** - Dispositions applicables à tous les ouvrages.
 - **2^e Partie** - Dispositions particulières -
 - Fascicule 1 - Dossier d'ouvrages
 - Fascicule 40 - Tunnels routiers, Tranchées couvertes, Galeries de protection.
Ministère des Transports - Direction des Routes et de la Circulation Routière. Diffusion SETRA.
- Normes AFNOR
 - NF P 15... - Liants et en particulier la norme P 15-301 : liants hydrauliques, définitions, classification et spécifications des ciments - Décembre 1981.
 - NF P 18... - Bétons - Granulats.
- AFNOR - Liste périodique des liants hydrauliques - Marque NF - VP Normes françaises - Ville de Paris.
- O.P.P.B.T.P. - Fiches de sécurité.
 - B.101 et B.102 - Protections collectives contre les chutes de hauteur en bâtiment.
 - B.201 et suivantes - Echafaudages, passerelles, etc.
 - C.301 et suivantes - Engins de levage.
 - D.403 - Circulation en galerie.

DOCUMENTS PUBLIES PAR L'ASSOCIATION FRANÇAISE DES TRAVAUX EN SOUTERRAIN

- AFTES - Groupe de travail : Soutènement et revêtement -
Réflexions sur les méthodes nouvelles de calcul du revêtement des souterrains - Tun-
nels et Ouvrages Souterrains - Numéro Spécial - Avril 1981, p. 98-123.
- AFTES - Groupe de travail : Traitement de terrains -
Recommandations concernant les travaux d'injection pour les ouvrages souterrains -
Tunnels et Ouvrages Souterrains - n° 10 / Juillet-Août 1975, p. 131-158.
- AFTES - Groupe de travail : Etanchéité -
Nomenclature des produits d'étanchéité utilisés en travaux souterrains - Tunnels et
Ouvrages Souterrains - n° 9 / Mai-Juin 1975, p. 104-106.
- AFTES - Groupe de travail : Etanchéité -
Recommandations sur l'étanchéité des ouvrages souterrains - Tunnels et Ouvrages Sou-
terrains - n° 35 / Septembre-Octobre 1979, p. 250-285 - et n° 36 / Novembre-Décembre
1979, p. 313-334.
- AFTES - Groupe de travail : Entretien et réparation des ouvrages souterrains -
Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus - Tunnels et Ouvrages Souterrains
- n° 44 / Mars-Avril 1981, p. 62-77.
- AFTES - Groupe de travail : Entretien et réparation des ouvrages souterrains -
- Catalogue des défauts apparents des tunnels - 63 pages
- Nomenclature des parties d'ouvrages en tunnel - 39 pages
tirés à part, AFTES, avril 1980.

*

**

Par ailleurs, on pourra trouver des indications relatives aux opérations de bétonnage
dans le Guide Général de Chantier - G.G. OA. 70, publié par le Service d'Etudes Techni-
ques des Routes et Autoroutes (SETRA) du Ministère des Transports.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Page de couverture : Autoroute A 6 - Tunnel sous Fourvière
(photo Studio Villeurbannais)

1 : Tunnel sous le Mont-Blanc
Tête France (photo STMB)

2 : Autoroute A 13 - Tunnel de St-Cloud
Bétonnage à l'avancement en demi-section supérieure
(photo D.R.E.I.F.)

3 : Définition géométrique de l'intrados de tunnels routiers
(photo Studio Villeurbannais)

4 : Autoroute A 40 - Tunnel de Chamoise
Aménagement type des banquettes

5 : Autoroute A 8 - Tunnel du col de Guerre
Ferrailage en cours de la voûte et des piédroits
(photo SCETAUROUTE)

6 : Autoroute A 8 - Tunnel de l'Angesse
Phases d'exécution dans le calcaire
(photo C.E.Tu.)

7 : Autoroute A 8 - Tunnel de l'Angesse
Phases d'exécution dans les marnes
(photo C.E.Tu.)

8 : Centrale d'inspection des tunnels routiers
(photo C.E.Tu.)

9 : S.N.C.F. - Ligne Paris-Est - Mulhouse
Tunnel de Marnay
(photo S.N.C.F.)

10 : Dégradation de béton
(photos C.E.Tu.)

11 : Détérioration du béton par gonflement
(photo C.E.Tu.)

12 : Tunnel André-Malraux (Cimiez) - Nice
(photo Ville de Nice)

13 : Autoroute A 8 - Tunnel du col de Guerre
Tête Ouest
(photo Yannick Collet)

14 : Autoroute A 6 - Tunnel sous Fourvière
Bétonnage de la partie inférieure de l'anneau externe
(photo Studio Villeurbannais)

15 : Tunnel routier du Fréjus
Bétonnage de la dalle des gaines de ventilation
(photo CE-GE)

16 : Tunnel sous le Mont-Blanc
(photo Mazda)

17 : Autoroute A 43 - Tunnel de l'Épine
Tête Ouest
(photo SPIE-Batignolles)

18 : Autoroute A 40 - Tunnel de Chamoise
Centrale de fabrication du béton - Tête Neyrolles
(photo C.E.Tu.)

19 : Matériel de bétonnage pour tunnels
(document SCHWING)

- 20 : Galerie technique sous Fourvière - Lyon
(photo Studio Villeurbannais)
- 21 : Autoroute A 8 - Tunnel du col de l'Arme
(photo Yannick Collet)
- 22 : Coffrage type circulaire - Autoporteur sur crayons
(document CERCOMAT)
- 23 : Tunnel de Buswiller - S.N.C.F.
Détail du pied de coffrage sur la longrine d'appuis
(photo La Vie du Rail)
- 24 : Croquis d'un type de dispositif d'appui de pied de coffrage
- 25 : Tunnel de Buswiller - S.N.C.F.
Coffrage d'arrêt ou masque
(photo La Vie du Rail)
- 26 : Tunnel de Buswiller - S.N.C.F.
Pipe de bétonnage
(photo La Vie du Rail)
- 27 : Tunnel de Buswiller - S.N.C.F.
Vibreurs de coffrage
(photo La Vie du Rail)
- 28 : Autoroute A 40 - Tunnel du Vuache
Tube Nord - Tête Ouest
(photo C.E.Tu.)
- 29 : Exemples de réservation pour joints d'étanchéité
- 30 : Autoroute A 40 - Tunnel du Vuache
Etanchéité extradados
(photo Yannick Collet)
- 31 : Tunnel du Chat - Chambéry
Etanchement par tôles parapluie
(photo C.E.Tu.)
- 32 : Autoroute A 8 - Tunnel de Ste-Lucie
Tête Ouest
(photo L.P.C. de Nice)
- 33 : Autoroute A 8 - Tunnel de Pessicart
Bétonnage de la casquette du tube Nord - Tête Ouest
(photo Yannick Collet)
- 34 : Autoroute A 8 - Tunnel de Las Planas
(photo Yannick Collet)
- 35 : Schéma type de la répartition des forages pour injection de remplissage
- 36 : Galerie technique sous Fourvière
Train pour injection de remplissage
(photo Studio Villeurbannais)
- 37 : Tunnel sous la Citadelle - Bastia
(photo C.E.Tu.)
- 38 : Autoroute A 8 - Tunnel de la Baume
(photo Yannick Collet)
- 39 : Autoroute A 40 - Tunnel de Chamoise
Section de mesures primaires
- 40 : Autoroute A 8 - Tunnel de la Giraude
Laboratoire régional de NICE

Composition-Photogravure par P C R A
maquette par le C E Tu. (M. PLASSE).
impression par le C E T E. de Lyon
109, avenue Salvador-Allende
69672 BRON CEDEX
où le volume a été achevé d'imprimer en 1983

Page laissée blanche intentionnellement