

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT
DIRECTION DES ROUTES

dossier pilote des tunnels génie civil

section 6 génie civil lié aux équipements et à l'exploitation

Juillet 1998

CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS
25, AVENUE FRANÇOIS-MITERRAND - CASE N°1 - 69674 BRON CEDEX - FRANCE
TEL : 04 72 14 34 00 - TELECOPIE : 04 72 14 34 30

I.S.B.N. 2-11-084743-3

SOMMAIRE

Chapitre 1	Préambule	5
Chapitre 2	Génie civil de second œuvre en tunnel	7
2.1	Faux plafonds et cloisons de ventilation	7
2.1.1	Critères de dimensionnement	7
2.1.2	Incidence des équipements d'exploitation	7
2.2	Communications entre les conduits d'air et le tunnel	8
2.2.1	Principes généraux	8
2.2.2	Caractéristiques géométriques	9
2.2.3	Influence sur le génie civil de l'ouvrage	9
2.3	Planchers supportant des charges routières	9
2.4	Autres ouvrages de génie civil liés aux équipements	10
Chapitre 3	Prise en compte d'un incendie en tunnel pour la conception du génie civil	11
3.1	Principes généraux - Terminologie	11
3.1.1	Définition des priorités	11
3.1.2	Comportement au feu des structures	11
3.2	Incendies de dimensionnement pour le génie civil	12
3.2.1	Conditions générales de l'incendie en tunnel	12
3.2.2	Résultats de l'expérience	12
3.2.3	Réglementation retenue pour les tunnels routiers	12
3.2.4	Cas des matières dangereuses	13
3.3	Exigences pour le comportement au feu	13
3.3.1	Réaction au feu	13
3.3.2	Résistance au feu	14
3.3.3	Stabilité au feu des structures	14
3.3.4	Structures principales	14
3.3.5	Structures secondaires	14
3.3.6	Conduite des calculs	15
3.4	Cas particuliers	15
3.4.1	Cas des couvertures légères	15
3.4.2	Tunnels intégrés à une structure habitée	15
3.4.3	Locaux techniques et stations de ventilation	15
3.4.4	Dispositifs d'évacuation et de protection des usagers	15
3.5	Récapitulation	16
Chapitre 4	Dispositions constructives	17
4.1	Dalles et plafonds	17
4.1.1	Dalles sous chaussées	17
4.1.2	Plafonds	19
4.2	Garages et niches	21
4.3	Ouvrages fonctionnels extérieurs au tunnel	24
4.3.1	Puits et galeries de transit	24
4.3.2	Stations de ventilation	24
	Bibliographie	24

Préambule

Pour rendre fonctionnel un tunnel routier, il faut :

- ◆ d'une part, adapter localement le gros œuvre pour prendre en compte les ouvrages annexes tels que garages, niches de sécurité, refuges, raccordement à des puits ou galeries. Quelques dispositions constructives relatives à ces ouvrages particuliers sont données au chapitre 4.
- ◆ d'autre part, prévoir le cas échéant des structures de second œuvre à l'intérieur du tunnel :
 - faux plafond et cloisons constituant des gaines de ventilation,
 - carreaux de ventilation ou bouches de soufflage et d'extraction,
 - planchers supportant les charges routières,

Les principes et critères de dimensionnement à appliquer pour la conception de ces ouvrages sont donnés au chapitre 2. Des dispositions constructives importantes concernant les dalles et plafonds sont rappelées au chapitre 4.

Les conditions de prise en compte d'un incendie en tunnel pour la conception du Génie Civil sont développées au chapitre 3. Les dispositions particulières concernant la collecte des liquides et notamment la limitation des risques d'incendie et d'explosion sont quant à elles développées en section 7 ("Assainissement, drainage et réseaux divers").

Enfin, quelques éléments concernant les ouvrages fonctionnels extérieurs au tunnel sont donnés au chapitre 4. Il s'agit des ouvrages suivants :

- puits ou galeries de liaison entre tubes ou avec la surface pour l'exploitation et la sécurité,
- puits ou galeries de ventilation et de désenfumage en cas d'incendie,
- stations de ventilation,
- locaux techniques.

En raison de ses implications tant en ce qui concerne certains aspects de la conception du gros œuvre que la géométrie et l'environnement, le poste "Génie civil lié aux équipements et à l'exploitation" doit retenir l'attention du projeteur dès le début des études.

Génie civil de second œuvre en tunnel

2.1 - Faux plafonds et cloisons de ventilation

2.1.1. Critères de dimensionnement

Le dimensionnement des éléments constitutifs des gaines de ventilation doit prendre en compte les différentes charges qui leur seront appliquées au cours de l'exploitation, à savoir :

- le poids propre des structures,
- les pressions d'air maximales qui découlent des calculs de ventilation (soufflage et aspiration),
- les surcharges d'exploitation,
- l'influence d'un incendie (voir chapitre 3).

Le projeteur doit combiner ces différents cas de charge et retenir pour chaque partie de la structure, l'hypothèse la plus défavorable correspondant à un cas de charge réaliste.

Les surcharges d'exploitation à prendre en compte dépendent :

- de l'accessibilité des gaines qui peuvent être réservées au seul personnel d'exploitation ou accessibles aux services de secours, voire aux usagers pour une évacuation d'urgence,
- des passages de fluides éventuels et de leur condition de mise en place,
- des opérations d'entretien et de réparation.

Les surcharges d'exploitation prises en compte actuellement sont bornées de la façon suivante :

⇒ Valeur minimale : 2,5 kN/m²

Cette valeur correspond à un usage minimal des

gaines : accès réservé au personnel d'entretien sans matériel lourd. Elle est du même ordre de grandeur que les pressions d'air produites par la ventilation du tunnel.

⇒ Valeur maximale : 5,0 kN/m²

Cette charge uniformément répartie est prise en compte par la norme NFP06.001 : Charge d'exploitation des bâtiments de juin 1986 pour les ateliers de fabrication légère afin de satisfaire aux travaux d'entretien ou de rénovation. Si de manière exceptionnelle, un matériel lourd fixe ou roulant devait être mis en place dans les gaines, il conviendrait alors de vérifier la stabilité de la dalle.

2.1.2 - Incidence des équipements d'exploitation

A des fins d'exploitation (pour inspection, nettoyage ou réparation), il est nécessaire de prévoir des facilités d'accès aux conduits de ventilation ; il est également conseillé d'y prévoir un balisage lumineux et à intervalle régulier des prises de courant pour brancher des baladeuses ou du petit outillage électrique.

La hauteur minimale de ces conduits en section courante est de 1,80 m à l'endroit le plus haut de la section transversale (pour la réalisation et l'exploitation). Sur de courtes longueurs il peut être envisagé de réduire cette dimension.

Les conduits d'air frais servent couramment au passage de câbles (électriques ou télétransmissions) de forts diamètres n'admettant pas de faible rayon de courbure. On a donc soin lors de la conception du faux plafond de prévoir les ouvertures nécessaires pour le tirage et la mise en œuvre de ces câbles.

2.2 - Communications entre les conduits d'air et le tunnel

2.2.1 - Principes généraux

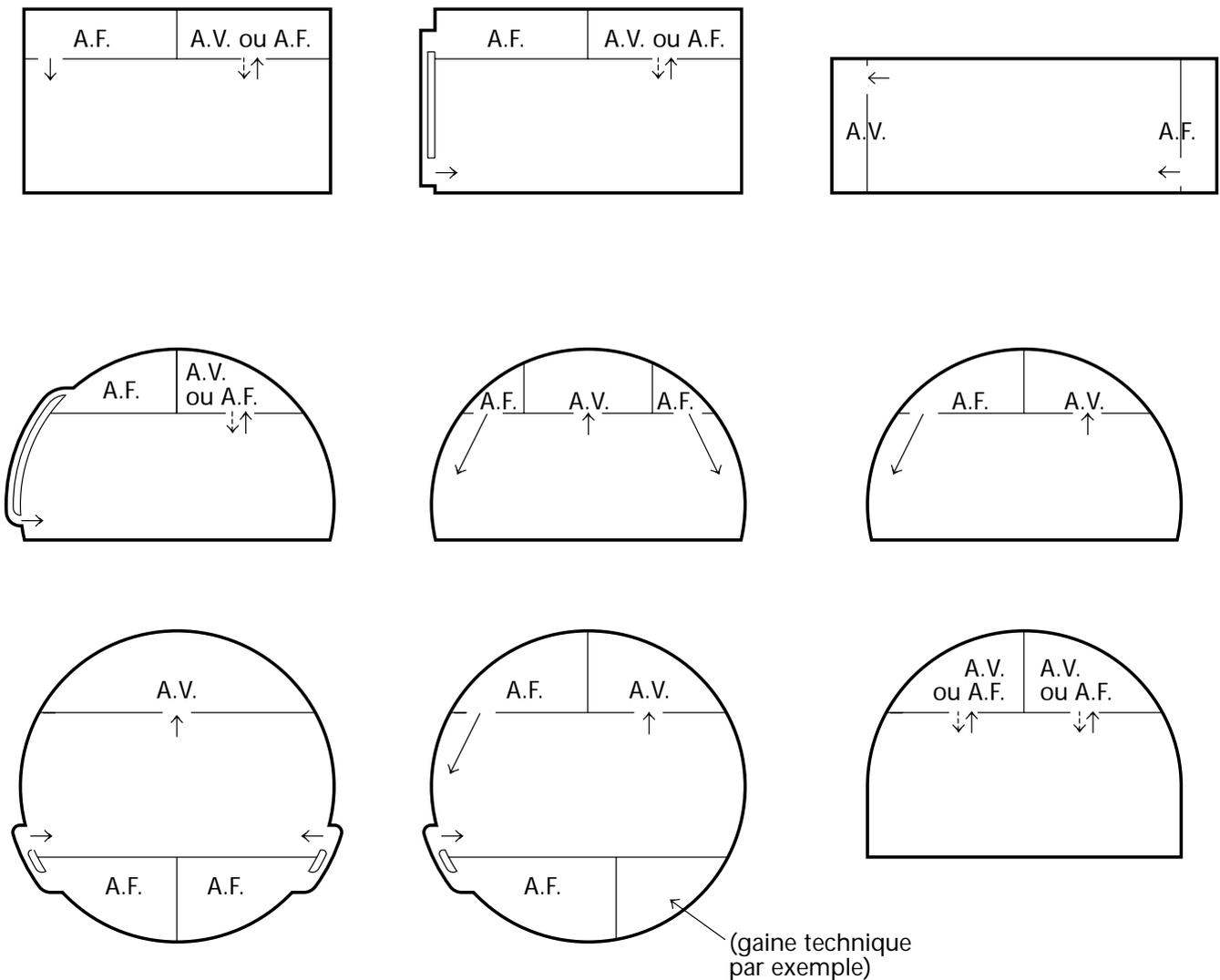
Selon le système de ventilation retenu, la forme de l'ouvrage, le nombre de voies de circulation, le nombre et la fonction des conduits d'air (air vicié (AV) seul, air frais (AF) seul ou AF en fonctionnement normal passant en AV en cas d'incendie), des dispositions très variables peuvent être retenues pour assurer la communication entre les conduits d'air et le tunnel (fig. 2.1).

◆ Pour la fonction AF seule, deux solutions peuvent être envisagées :

a) Soit de simples ouvertures situées sur le côté pour les gaines situées en voûte (jet pariétal) ou en partie inférieure dans le cas de gaines latérales.

b) Soit dans le cas des gaines AF situées en voûte (ou à moindre échelle dans la solution avec gaines AF situées sous la chaussée), mise en œuvre de carreaux de ventilation de manière à ce que l'injection de l'AF se fasse au niveau des trottoirs.

Cette disposition est maintenant réservée aux tunnels pour lesquels il n'a pas été possible de tronçonner la ventilation par cantons élémentaires suffisamment courts (voir section Ventilation du document Equipements). Elle peut conduire à une augmentation de l'épaisseur du revêtement pour y inclure les carreaux.



▲ Fig. 2.1

Différentes dispositions possibles pour le soufflage et l'aspiration

Dans tous les cas, les ouvertures et les carnaux de ventilation sont équipés de bouches de soufflage et d'extraction, de manière à assurer une répartition régulière des débits.

◆ Pour la fonction AF réversible en AV, les dispositions précédentes concernant la fonction AF sont le plus souvent complétées par de grosses trappes de désenfumage qui ne sont ouvertes qu'en cas d'incendie.

◆ Pour la fonction AV uniquement (système transversal partiel ou transversal pur), il est réservé une simple ouverture au niveau du faux plafond (le plus au milieu possible dans le cas d'un profil circulaire ou rectangulaire avec gaines au-dessus) ou dans la cloison de séparation en partie haute pour les conduits latéraux d'air vicié. On peut également dans certains cas, ne réserver que de grosses trappes de désenfumage.

Dans le cas des tranchées couvertes, la solution par trappe de désenfumage permettant une communication directe avec l'air libre doit être examinée compte tenu de son intérêt.

2.2.2 - Caractéristiques géométriques

Il est difficile de donner une loi générale, les caractéristiques géométriques des ouvertures et des carnaux étant directement liées à leur espacement et aux débits d'air à insuffler ou à extraire (se référer au document Equipements).

Les réservations à prévoir dans le génie civil sont en général les suivantes :

⇒ Bouches simples à jet pariétal :
15 x 60 cm²

⇒ Bouches de soufflage mixtes AF - AV :
20 x 50 ou 30 x 30 cm²

⇒ Bouches avec carnaux :
20 x 50 cm²

⇒ Bouches AV :

Les dimensions standard sont 20 x 50 ou 30 x 30. Une plus grande souplesse dans l'interdistance et dans le débit unitaire est possible, une bonne répartition de l'AV n'étant pas indispensable.

⇒ Trappes de désenfumage (incluses dans le faux-plafond)

Il n'existe pas de disposition-type actuellement. Ces trappes ont une ouverture de 1 à quelques m².

2.2.3 - Influence sur le génie civil de l'ouvrage

Dans de nombreux cas, l'insufflation de l'air frais et la reprise de l'air vicié se font par de simples ouvertures

(équipées ensuite) dans les cloisons ou dans le faux plafond.

L'interdistance entre bouches et la longueur des coffrages utilisés (ou des éléments préfabriqués) doivent être harmonisés de manière à assurer la répétitivité des réservations. En outre, dans le cas des jets pariétaux, il convient également de prendre en compte l'implantation des appareils d'éclairage (et leur pas) et des chemins de câbles.

2.3 - Planchers supportant des charges routières

Dans le cas le plus fréquent, la circulation des véhicules emprunte une chaussée fondée directement au terrain encaissant ou sur un radier lui-même au contact du terrain, et la transmission des charges et efforts n'a qu'une incidence négligeable sur la structure principale de l'ouvrage.

La situation est tout-à-fait différente lorsque le tunnel est constitué d'un tube (fermé ou non), à l'intérieur duquel la circulation est supportée par une dalle isolée du radier, et sous laquelle des galeries techniques ou d'amenée d'air trouvent leur place.

Ce cas de figure correspond entre autres aux ouvrages creusés au moyen d'un tunnelier.

La dalle support de chaussée doit alors être dimensionnée comme un ouvrage d'art classique, en tenant compte de la nature des liaisons avec la structure principale.

- Des efforts qui peuvent être importants lui sont en effet transmis, et les conséquences doivent être correctement évaluées (cas des vousoirs notamment).

- Outre le poids propre des structures et revêtements de chaussée, le projeteur doit prendre en compte :

- les surcharges d'exploitation en se référant au fascicule 61 (titre II) du CCTG

- les pressions d'air (ou dépression) dans les gaines au contact de la dalle, le cas échéant,

- l'influence d'un incendie (dilatation, gradient thermique...).

Ce type de dalle peut être soit coulé en place, soit partiellement préfabriqué (BA ou BP). Le chapitre 4 ci-après commente quelques dispositions constructives.

2.4 - Autres ouvrages de génie civil liés aux équipements

Pour mémoire, il convient de citer les réservations nécessaires aux refuges pour les usagers en cas d'incendie nécessitant des dispositions spéciales au point de vue de la ventilation.

Il conviendra également de prendre en compte dans les différentes stations de ventilation, les besoins propres pour les équipements autres que la ventilation à savoir l'alimentation électrique, l'éclairage, la signalisation, les télétransmissions... Dans de nombreux cas, ces différents équipements nécessitent l'implantation en tunnel ou hors tunnel de locaux techniques spécifiques.

Le chapitre 4 ci-dessous précise différentes dispositions constructives pour ces ouvrages particuliers.

Prise en compte d'un incendie en tunnel pour la conception du génie civil

Les exigences pour le comportement du génie civil en cas d'incendie sont abordées dans la circulaire interministérielle n°81-109 du 29 décembre 1981 relative à la sécurité dans les tunnels routiers. Ce texte, en cours de refonte, comportera en annexe une directive, dont le projet a servi de base à l'établissement du présent chapitre. Certaines dispositions formulées ci-après seront à adapter s'il y a lieu après parution de la nouvelle circulaire.

D'autre part, les textes relatifs à la réaction au feu et à la résistance au feu seront révisés dans les prochaines années pour intégrer les règles données par les Eurocodes.

3.1 - Principes généraux - Terminologie

3.1.1 - Définition des priorités

Les différents scénarios d'incendie potentiels en tunnel sont avant tout envisagés dans le cadre des études de sécurité et de ventilation.

La priorité est alors donnée à l'évacuation des usagers du tunnel et à l'accès des pompiers et des secours sur les lieux du sinistre, qui doivent se faire en toute sécurité.

Pour ce qui concerne les éléments de génie civil, tant du gros œuvre, que du second œuvre, ils doivent résister au feu au moins pendant le temps nécessaire à ces opérations de secours et permettre d'assurer leur fonction liée au maintien de la sécurité (évacuation des fumées).

Ensuite, le maintien de la pérennité des tunnels, totale ou partielle, après un incendie reste à examiner en fonction des risques encourus pour l'ouvrage ou son environnement, ou de son importance dans le schéma de circulation.

La résistance au feu sera adaptée en conséquence. On saura ainsi distinguer entre des ouvrages à caractère stratégique ou fragile (tunnel immergé, tunnel sur itinéraire sans substitution possible), et ceux dont l'importance est moindre ou qui sont particulièrement résistants par nature (tunnel au rocher).

Les éléments de second œuvre et les ouvrages spécifiques de sécurité (sas, conduit de ventilation, porte de communication, cloisons...) doivent respecter par ailleurs des exigences particulières.

3.1.2 - Comportement au feu des structures

Les structures importantes ne peuvent pas être testées en laboratoire. Leur comportement du point de vue de la stabilité au feu fait l'objet de calculs portant sur l'évolution des caractéristiques des matériaux en fonction de la température. Des essais portant sur des dalles et des voiles ont permis de valider les approches numériques.

Le document technique unifié (D T U) publié par le CSTB, cahier 2188 d'octobre 1987 expose la méthode de prévision pour le calcul du comportement au feu des structures en béton armé ou précontraint.

Le D T U - cahier 1840 de décembre 1993 présente la méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier.

Dans le cas de structure en béton armé ou précontraint, la stabilité mécanique est assurée par les aciers d'armature dont la résistance mécanique diminue sous l'effet de la chaleur produite par un incendie. De plus, si l'acier est chauffé au-delà de 450 °C, il ne récupère pas intégralement ses caractéristiques mécaniques après refroidissement. La durée de stabilité au feu est ainsi directement liée à l'épaisseur d'enrobage des armatures qui limite la montée en température de l'acier.

Cependant lorsque l'enrobage des aciers du côté de la face exposée au feu est supérieur à 4,5 cm, il y a éclatement ou fissuration du béton jusqu'aux aciers entraînant des inconvénients majeurs.

A titre indicatif le D T U indique pour un mur de 15 cm exposé au feu d'un seul côté que la température de 400° C est atteinte sur une épaisseur de 3 cm après 1 h d'exposition au feu normalisé ISO.

Afin d'augmenter la durée au bout de laquelle un seuil de température fixé est atteint, les surfaces exposées peuvent être protégées par des enduits réalisés avec des produits ignifuges spéciaux.

3.2 - Incendies de dimensionnement pour le génie civil

3.2.1 - Conditions générales de l'incendie en tunnel

L'énergie calorifique développée sur les éléments de structure dépend non seulement de la qualité et de la nature du combustible (hydrocarbure, bois, plastiques, pneumatiques...), mais aussi de la quantité de comburant (air frais) entretenant le feu et de l'étalement du feu et de l'air chaud régi par la vitesse d'écoulement de l'air.

Les conditions de ventilation (forcée ou naturelle) lors de l'incendie sont alors primordiales mais bien difficilement quantifiables. C'est pourquoi une approche du problème de l'incendie doit être abordé avec pragmatisme. Les chiffres qui sont avancés ci-dessous intègrent les résultats de l'expérience et de la réglementation en vigueur, en regard principalement du potentiel d'énergie calorifique des poids lourds et prenant en compte les temps d'intervention des secours.

Le cas des matières dangereuses autorisées à transiter en tunnel sort du cadre de ces recommandations et doit faire l'objet d'une étude spécifique.

3.2.2 - Résultats de l'expérience

L'expérience a montré qu'un incendie de voiture ne provoque généralement pas de dégâts aux structures.

Par contre, un incendie de camion peut entraîner la

destruction par fusion ou ramollissement de chemins de câbles en aluminium (température de fusion 650 °C) et une fissuration importante au droit du ferrailage de la dalle en plafond avec mise à nu des armatures.

Un incendie long d'hydrocarbures pourrait menacer la structure principale.

Des essais divers ont été réalisés pour simuler des cas réels d'incendie. On peut notamment citer ceux du Memorial Tunnel aux USA (1995) ainsi que ceux développés dans le cadre du projet EUREKA-FIRETUN (1994-1995). L'incendie du tunnel sous la Manche en 1996 présente également un grand intérêt dans le cas qui nous intéresse ici.

3.2.3 - Réglementation retenue pour les tunnels routiers

En l'état actuel, et bien que des réflexions entreprises à l'échelle nationale et internationale permettent d'envisager une évolution des textes et recommandations, la réglementation générale existante doit être utilisée pour fixer les objectifs à atteindre, concernant le comportement au feu du génie civil des tunnels routiers.

En particulier la courbe ISO (figure 3.1) reste la courbe de feu de référence pour les tests et les calculs permettant d'appliquer les règles des D.T.U.

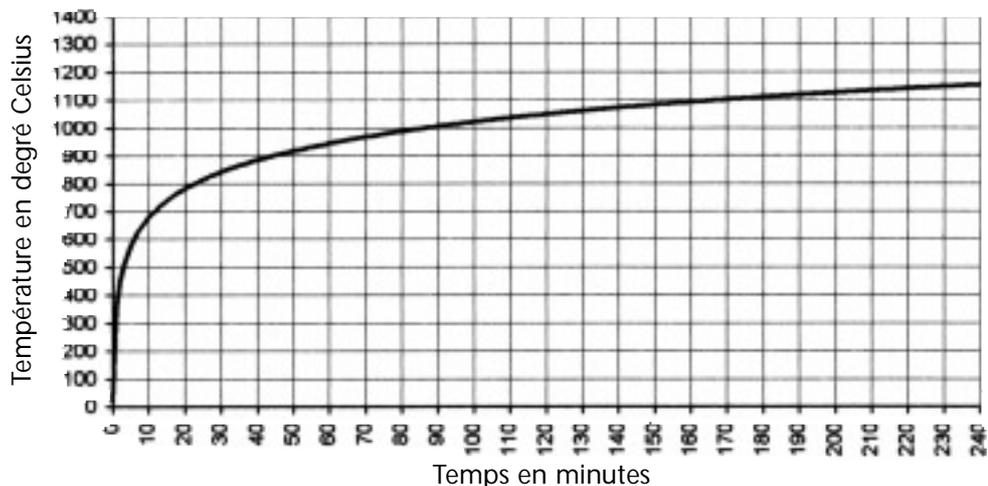
Cette courbe a l'équation suivante, où T-To représente l'évolution de température.

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$$

T_0 = Température initiale au temps $t = 0$ (en degrés)

T = Température atteinte au temps t (en degrés)

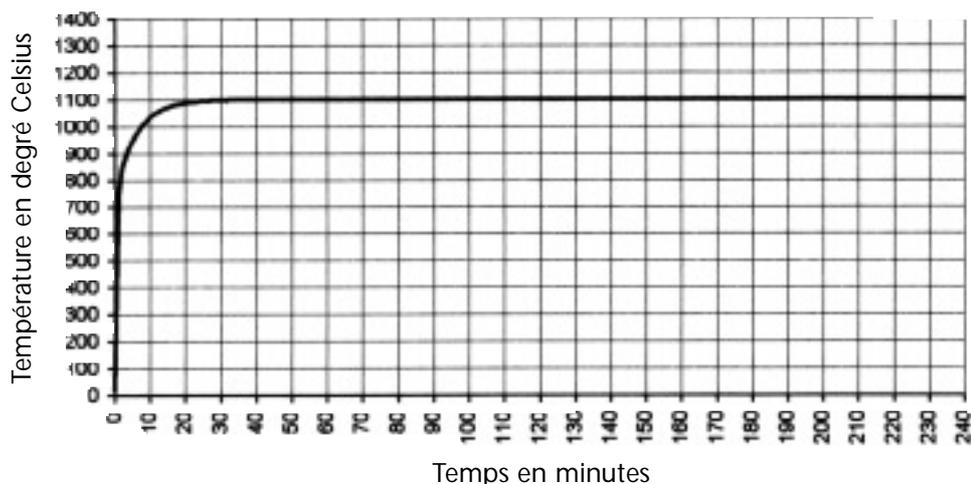
t = Temps mesuré en minutes



▲ Fig. 3.1

Courbe ISO 834 - $T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1)$

Dans le cas de prise en compte d'un feu d'hydrocarbures, on utilisera la courbe de référence ci-dessous actuellement proposée dans le cadre de la mise à jour de la circulaire 81.109 (fig. 3.2).



▲ Fig. 3.2

Courbe de feu d'hydrocarbures - $T - T_0 = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$

3.2.4 - Cas des matières dangereuses

Certains ouvrages sont ouverts au transit de transport de matières dangereuses (TMD), après avis de la commission spécialisée de sécurité.

En cas de sinistre, les effets sur les structures de l'ouvrage peuvent être très fortement aggravés par rapport à une situation courante :

- Les feux d'hydrocarbures sont susceptibles d'atteindre des durées importantes, compte tenu du volume de carburant en jeu, et même si la température maximale atteinte reste du même ordre de grandeur que précédemment, la rapidité de son élévation est beaucoup plus brutale, créant des chocs thermiques violents dans les matériaux. La résistance d'une dalle en béton armé, en plafond par exemple, en sera amoindrie.

- L'explosion d'une citerne de gaz aurait certainement des effets localement dévastateurs, compte tenu de l'onde de choc dans un volume réduit. (Le tunnel de Liefkenshoek à Anvers a été étudié pour résister à une explosion compte tenu du trafic intense de matières dangereuses qui l'emprunte).

Ce dernier type d'accident reste heureusement rarissime, ce qui conduit à ne pas le prendre en compte dans le dimensionnement des structures secondaires.

Le cas échéant, il conviendrait de s'interroger sur la résistance des structures principales (notamment le revêtement) dans la configuration d'une traversée sous-fluviale ou sous un immeuble par exemple. Il ne peut s'agir là que de cas isolés nécessitant une réflexion particulière.

3.3 - Exigences pour le comportement au feu

Le comportement au feu d'un matériau traduit son évolution au cours d'un incendie sous divers aspects : combustion, émission de fumées, dégagement de gaz, pertes de propriétés mécaniques, pertes de propriétés isolantes, etc... Outre les propriétés physico-chimiques fondamentales du matériau, le comportement au feu se caractérise de 2 manières :

3.3.1- Réaction au feu

C'est l'aptitude du matériau à participer, notamment par sa propre décomposition, au feu auquel il est exposé.

L'arrêté du 30 juin 1983 (Journal Officiel du 1er décembre 1983) porte sur la classification des matériaux de construction et d'aménagement selon leur réaction au feu et définit des méthodes d'essais.

Les éléments de classification retenus sont d'une part, la quantité de chaleur dégagée au cours de la combustion et, d'autre part, la présence ou l'absence de gaz inflammables.

L'opacité et la toxicité des produits de combustion ne sont pas pris en compte par la réglementation. Bien que ces critères ne soient pas codifiés en France, il importe d'écarter tout matériau pouvant émettre des gaz toxiques ou des fumées abondantes.

Les matériaux sont répartis en cinq catégories, du moins combustible au plus combustible, appelées : M0, M1, M2, M3 et M4.

Le béton, le verre, la pierre, la brique, le fibro-ciment ont reçu un classement conventionnel en M0.

Certains produits comme les câbles et conducteurs électriques font l'objet d'essais et de classifications spéciaux.

3.3.2 - Résistance au feu

C'est l'aptitude d'un élément à conserver, malgré le développement de l'incendie, pendant une durée déterminée, l'ensemble des propriétés nécessaires à son utilisation.

L'arrêté du 21 avril 1983, (J.O. du 03.07.1983) donne les critères permettant de déterminer le degré de résistance au feu des éléments de construction, des méthodes d'essais et définit le programme thermique matérialisant l'action des incendies.

Trois critères sont retenus :

- 1 - Résistance mécanique, (stabilité de l'élément de construction et maintien du rôle mécanique), chauds ou inflammables,
- 2 - Etanchéité aux flammes et aux gaz,
- 3 - Isolation thermique.

La classification des éléments par des essais est établie en fonction du respect de certains critères et de la durée du respect de ces critères.

On détermine ainsi trois classements : stable au feu (SF), pare-flammes (PF) et coupe feu (CF).

Critères	Catégorie de classement		
	S F	P F	C F
1. Résistance mécanique	X	X	X
2. Etanchéité aux flammes		X	X
3. Isolation thermique			X

Dans chaque catégorie, le classement s'exprime en "degré" en fonction du temps pendant lequel l'élément satisfait aux différents critères. Ces degrés de résistance au feu réglementaires sont : 1/4h, 1/2h, 3/4h, 1h, 1h1/2, 2h, 3h, 4h, 6h.

3.3.3 - Stabilité au feu des structures

Pour les tunnels routiers laissant transiter des véhicules légers et des poids lourds ne transportant pas de matières dangereuses, le degré de résistance au feu vis à vis de la stabilité mécanique a pour valeur de référence une heure et demie.

SF référence = 1h1/2

Cette valeur de référence est à moduler pour chaque type de nature d'ouvrage, voire de trafic et en fonction :

- des possibilités de réparation,
- des conséquences des dégâts sur la stabilité globale de la structure du tunnel.

Dans tous les cas, l'exigence minimale pour un tunnel routier est fixée à une heure.

SF min = 1h.

3.3.4 - Structures principales

On s'intéresse ici au cas des tunnels creusés et tranchées couvertes (voir plus loin le cas des couvertures légères).

Le revêtement des tunnels creusés se présente sous différentes formes suivant le mode de revêtement adopté :

- tunnel non revêtu : il n'y a pas d'exigence particulière,
- tunnel revêtu de béton projeté : on admet la ruine du béton projeté et dans ce cas on retient un degré de stabilité au feu d'une heure,
- tunnel revêtu de béton coulé en place, armé ou non : le revêtement pourra être altéré en surface sans effondrement de la structure. Il est demandé le degré de stabilité au feu de référence d'une heure et demie.

Pour les tranchées couvertes, les tunnels en milieu aquifère, les tunnels constitués de voussoirs et les tunnels immergés, les conséquences d'un incendie pouvant être plus graves, le degré de stabilité au feu pour toute la structure est porté à 2 heures pour avoir une sécurité accrue.

3.3.5 - Structures secondaires

Seuls les cas les plus fréquemment rencontrés sont examinés ci-après (faux-plafonds et parois séparant deux conduits de ventilation). Il existe beaucoup de cas particuliers qui demandent un examen spécifique.

Les faux-plafonds servant à délimiter un conduit de ventilation par rapport au tunnel, doivent présenter un degré de stabilité au feu correspondant à la valeur de référence (1h1/2). Comme ils présentent généralement des bouches de soufflage ou d'aspiration il n'est pas envisageable de leur demander d'être coupe-feu.

Lorsque les galeries formées par le faux-plafond servent à l'évacuation des usagers, le degré de stabilité au feu est fixé à 2h dans tous les cas. Il faut alors assurer la fonction coupe-feu pendant 1 heure (voir aussi le tableau récapitulatif).

Les conséquences sur le parti constructif des faux plafonds de ventilation sont les suivantes :

- épaisseur minimale : 15 cm,
- enrobage des aciers : 3 cm,
- choix des aciers de faible diamètre et bien répartis sur toute la face potentiellement exposée.

Les parois séparant deux conduits de ventilation doivent être coupe-feu de degré 1h.

3.3.6 - Conduite des calculs

La conduite des calculs sera exécutée conformément aux règles édictées dans les D.T.U. à partir du temps de résistance au feu proposé.

La dilatation des éléments de structure devra être prise en compte pour la vérification des sections.

3.4 - Cas particuliers

3.4.1 - Cas des couvertures légères

Ce type d'ouvrage se rencontre en général dans les tranchées couvertes construites pour servir de protection phonique. Ces structures sont souvent très sensibles à un incendie, compte tenu de la nature des matériaux employés (souvent métalliques). Il est conseillé une stabilité au feu (SF) de 1h pour les structures porteuses et les ossatures secondaires, lorsqu'elles sont facilement réparables.

Lorsque la couverture sert de passage pour piétons, les services de secours locaux seront consultés afin de spécifier la stabilité au feu à prendre en compte.

La protection des ossatures secondaires est parfois réalisée par l'application d'enduits. Ces produits ont des durées de vie limitées et ils doivent être renouvelés. Les éléments de remplissage (lanterneau) doivent être classés M0 ou éventuellement M1 après examen. Sous l'action de la chaleur ils peuvent se déformer, couler et ainsi créer des ouvertures faisant office de cheminée.

La fumée s'évacue par ces orifices, mais crée également un appel d'air frais qui attise l'incendie. C'est le cas de tous les matériaux translucides en matière plastique que l'on pourrait remplacer par des plaques en verre armé coupe-feu (1h 1/2).

3.4.2 - Tunnels intégrés à une structure habitée

La circulaire n° 81 109 du 29 décembre 1981 donne les règles à respecter dans le cas où la structure de l'ouvrage souterrain est intégrée à certains bâtiments. Cette situation se rencontre de plus en plus en milieu urbain.

"Lorsque le tunnel se trouve contigu ou situé sous un immeuble habité ou occupé, les murs ou les parois mitoyens seront :

- coupe-feu de degré quatre heures pour un immeuble de grande hauteur
- coupe-feu de degré trois heures pour un établissement recevant du public, un établissement classé au titre de la loi du 19 juillet 1976, en raison du risque d'incendie
- coupe-feu de degré deux heures dans les autres cas.

Dans la mesure où une ou plusieurs parties du tunnel constituent des éléments de la structure porteuse des bâtiments en superstructure, indépendamment des mesures citées ci-dessus, ces éléments porteurs devront présenter le même degré de stabilité au feu que celui des bâtiments en superstructure".

3.4.3 - Locaux techniques et stations de ventilation

Si les locaux techniques communiquent directement avec le tunnel, les portes de communication doivent être coupe-feu de degré une heure et demie. Toutefois, pour les cas où les locaux techniques présentent des dangers particuliers d'incendie, l'installation d'un sas ventilé est conseillée, et dans ce cas chaque porte doit être coupe-feu de degré une heure.

Dans le cas d'usines de ventilation implantées au-dessus du tunnel, les parois ou les dalles mitoyennes des bâtiments doivent être du même degré de stabilité au feu que celui demandé pour le tunnel proprement dit.

3.4.4 - Dispositifs d'évacuation et de protection des usagers

Les galeries de communication entre tubes pour l'évacuation des usagers quand elles existent, séparées du tunnel par un sas, doivent être protégées par des portes coupe-feu de degré une heure (donc la durée de protection du sas est de deux heures).

Les cloisons et les sas d'accès des refuges doivent également être coupe-feu de degré deux heures.

Les refuges sont maintenant fréquemment pressurisés, une gaine d'air frais alimentant directement le local.

3.5 - Récapitulation

Exigences de comportement au feu du génie civil des tunnels routiers (sans transit de matières dangereuses).

Éléments	Réaction au feu
Matériaux généraux de construction	M0 Exceptionnellement M1

Structure	Résistance au feu degré en heures suivant courbe ISO	
	Stable au feu (SF)	Coupe feu (CF)
Tunnel non revêtu	Pas d'exigence particulière	
Tunnel revêtu de béton projeté	1	-
Tunnel revêtu de béton coffré	1 1/2	-
Tranchée couverte	2	-
Tunnel en milieu aquifère, immergé ou en voussoirs assemblés	2 minimum	2
Couverture légère * avis des services locaux des pompiers si la couverture est circulée par des piétons	1	-
Murs ou parois mitoyens de tunnel intégré à un immeuble habité ou occupé.	-	4 (IGH) 3 (ERP) 3 (établissements classés pour risque d'incendie) 2 (autres cas)
Faux plafond servant à délimiter un conduit de ventilation.	1 1/2	-
Idem utilisé pour l'évacuation des usagers.	2	1
Paroi séparant 2 conduits de ventilation.	-	1
Paroi entre tunnel et local technique. Si le local technique présente des risques particuliers, un sas est conseillé.	-	1 1/2
Séparation entre tunnel et station de ventilation située en dessus.	Même degré de stabilité au feu que le tunnel	-
Sas entre tunnel et galerie d'évacuation des usagers.	-	2
Sas et cloisons de refuge.	-	2
Autres éléments	exigence minimale 1 (*)	

(*) Elle peut être augmentée (temps d'intervention des secours ou conséquence d'une indisponibilité du tunnel).

Dispositions constructives

4.1 - Dalles et plafonds

Les dalles, plafonds et cloisons sont le plus souvent en béton armé et préfabriquées, l'usage de la préfabrication permettant d'abaisser les coûts tout en améliorant la qualité.

4.1.1 - Dalles sous chaussées

La largeur des dalles supportant la circulation, et les trottoirs le cas échéant, conditionne le système d'appuis à prévoir.

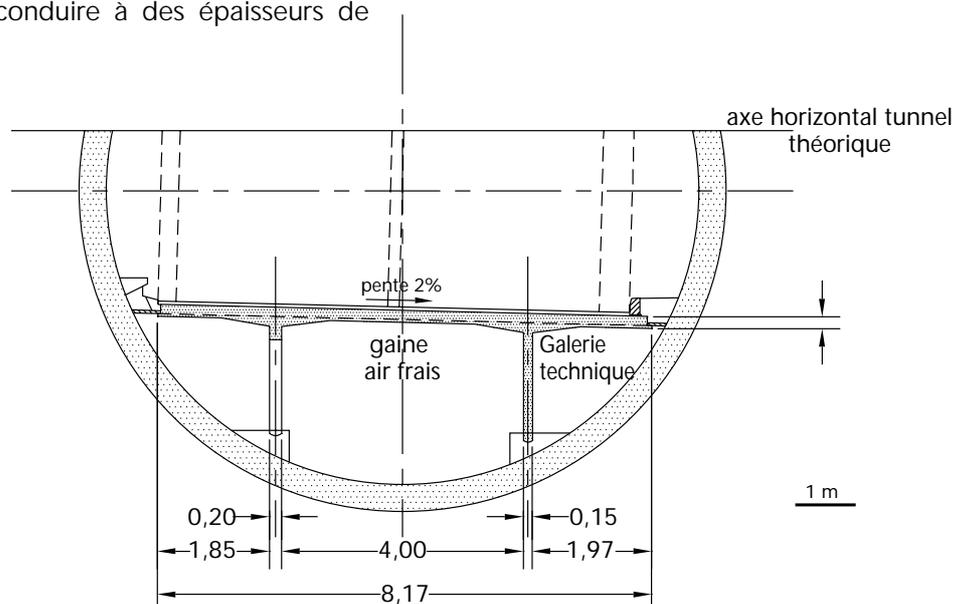
Une faible largeur roulable peut s'accommoder de 2 appuis latéraux sans conduire à des épaisseurs de

dalle prohibitives.

Par contre, au-delà de 7 m, il peut être intéressant d'introduire un appui intermédiaire (cloison verticale séparant les conduits inférieurs) ou un meilleur équilibrage transversal en conservant des consoles en about (figure 4.1).

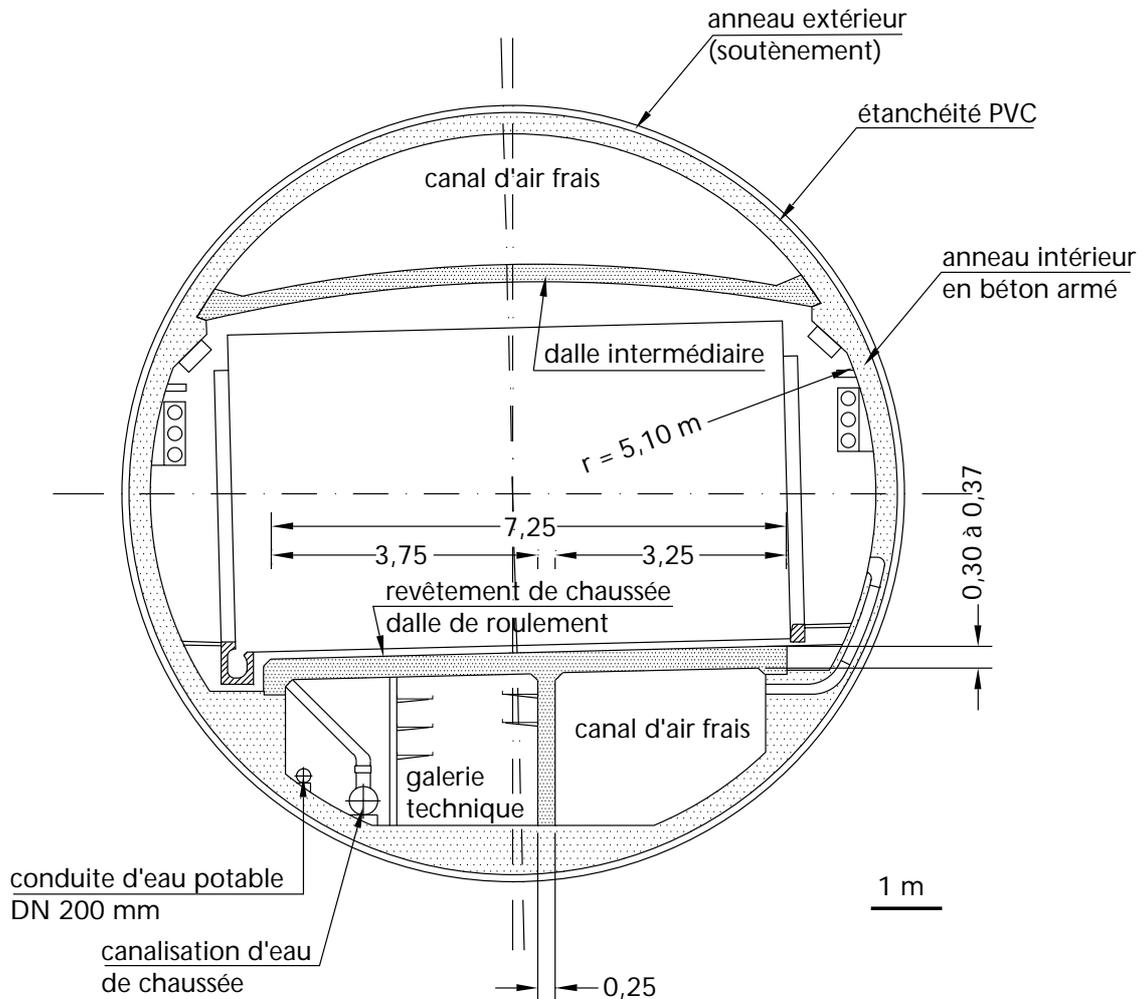
Dans le cas particulier des projets de voirie souterraine réservée aux véhicules légers (par exemple A 86 Ouest dans la région parisienne), véhicules qui sont répartis sur 2 niveaux dans le même tube, aucun appui n'est possible pour la dalle centrale, compte tenu de la circulation inférieure.

Les charges roulantes restent toutefois suffisamment faibles pour accepter deux appuis latéraux et une grande portée.



▲ Fig. 4.1 a

Exemple de dalle sous chaussée - Boulevard Périphérique Nord de Lyon



▲ Fig. 4.1 b

Exemple de dalle sous chaussée (tunnel du Mont Terri - Suisse)

Conditions d'appui

S'agissant d'une dalle en général de grande longueur, compte tenu du type d'ouvrage où ce système est retenu, le nombre d'appareils d'appui est très élevé dans le cas d'un système isostatique dans le sens transversal (appuis néoprène pour le tunnel sous Fourvière à Lyon).

Il convient par conséquent d'être très vigilant sur la qualité des dispositions constructives, compte tenu des coûts de maintenance, et de veiller en particulier à la protection de ces appareils contre les eaux de ruissellement qui finissent par s'infiltrer entre la dalle et le revêtement du tunnel.

Ces difficultés sont supprimées avec une dalle encastree sur les bords. L'épaisseur du revêtement du tunnel doit alors pouvoir reprendre des efforts de torsion importants, ce qui en fait un cas plutôt adapté aux revêtements coulés en place (en pleine épaisseur ou double peau).

En effet, pour les ouvrages revêtus de voussoirs préfabriqués, la transmission des efforts de torsion aux voussoirs voisins nécessite un système de clavage

conséquent, et la déformation de l'ensemble n'est pas sans risque pour l'étanchéité entre pièces.

D'autre part, le raccordement de la dalle sur les voussoirs reste un point faible (perforation de la pièce pour scellement des aciers en attente, risque de corrosion dans le plan de fissuration).

Dans le cas d'une dalle avec consoles d'extrémité, il convient de rester vigilant sur la qualité du dispositif d'étanchéité en about (zone soumise aux vibrations, dilatations et agressions chimiques).

La dilatation longitudinale de la dalle doit également être prise en compte.

Incidence des équipements

Dans le cas d'une dalle, de nombreuses réservations doivent être prévues pour le passage des diverses canalisations, qui desservent, à partir de la galerie technique inférieure, les équipements situés au niveau de la circulation.

Le recueil des eaux de ruissellement, et éventuellement matières dangereuses, doit bien sûr être prévu.



Coffrage de dalle de plafond

4.1.2 - Plafonds

De nombreux dispositifs d'accrochage des plafonds sont possibles (figure 4.2) :

- pose des plafonds sur des consoles d'appui encastées dans le revêtement ou sur des appuis continus intégrés à celui-ci ;
- ancrages latéraux des plafonds ;
- ancrage des plafonds par l'intermédiaire des cloisons et suspentes ;
- pose des plafonds sur des éléments de revêtement de piédroits.

Le choix du dispositif retenu dépend du mode de revêtement adopté, de la présence éventuelle d'une couche d'étanchéité, et de la portée du faux plafond.

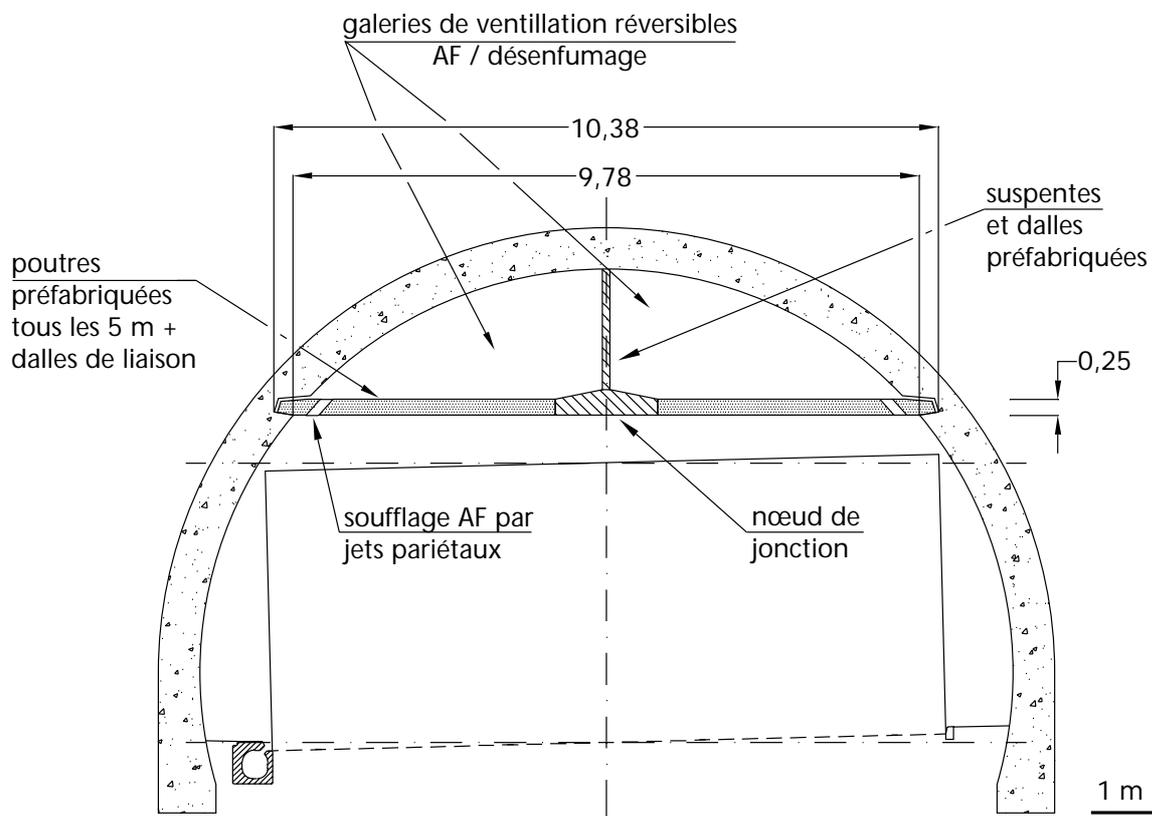
Les plafonds sont généralement plans, mais il peut être intéressant de leur donner une légère courbure. Cette disposition, outre l'intérêt esthétique, améliore la tenue au feu et optimise la structure.

L'attention du projeteur est attirée sur les problèmes posés par la tenue au feu des suspentes, qui nécessitent chaque fois une étude très approfondie, compte tenu des risques de rupture.

Suivant le mode de construction prévu, il conviendra de décider si le faux plafond doit suivre ou non les variations du dévers de la chaussée pour respecter la hauteur libre et l'implantation des équipements.

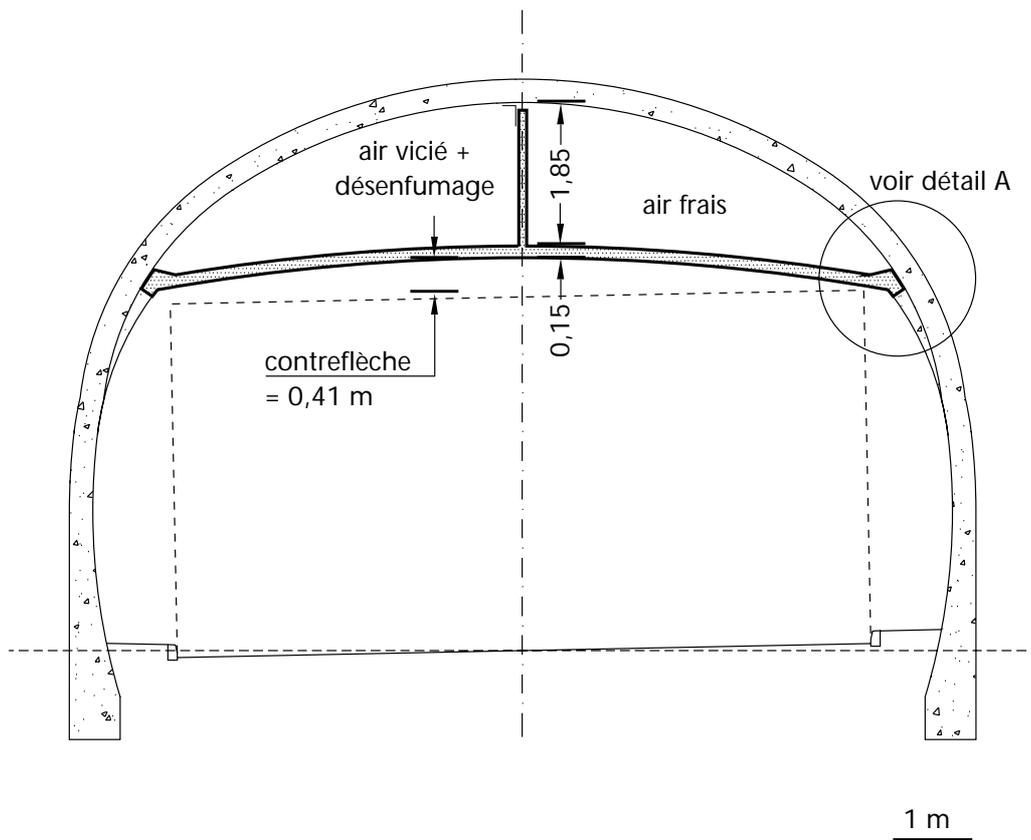
Dans le cas des systèmes avec faux plafond, on doit veiller à ce qu'une bonne étanchéité à l'air soit assurée entre, d'une part, la ou les galeries pouvant transporter de l'air vicié, et d'autre part, la galerie d'air frais et le tunnel.

On veille particulièrement au bon fini du bétonnage, de manière à diminuer les aspérités en section normale, et au bon traitement des joints de bétonnage. En effet, le coefficient de perte de charge frictionnel pour le calcul du dimensionnement des ventilateurs dépend étroitement de la rugosité relative du conduit et sa diminution permet des économies d'énergie en exploitation.

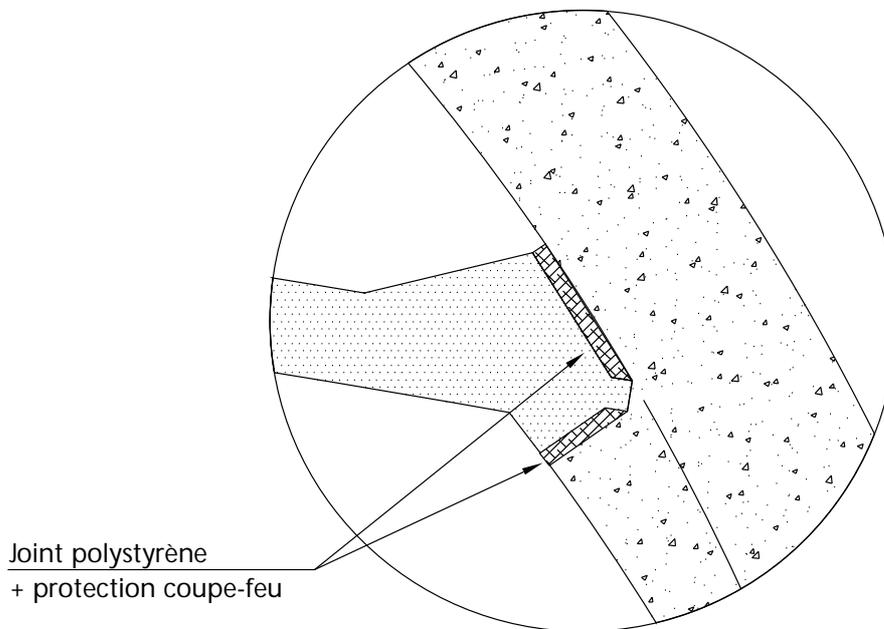


▲ Fig. 4.2.a

Exemple de dalle en plafond - Dalle préfabriquée partiellement suspendue (tunnel du Siaix)



Détail A



▲ Fig. 4.2.b

*Exemple de dalle en plafond - Dalle voûtée appuyée sur corbeaux
(Tunnel de la Citadelle à Besançon)*

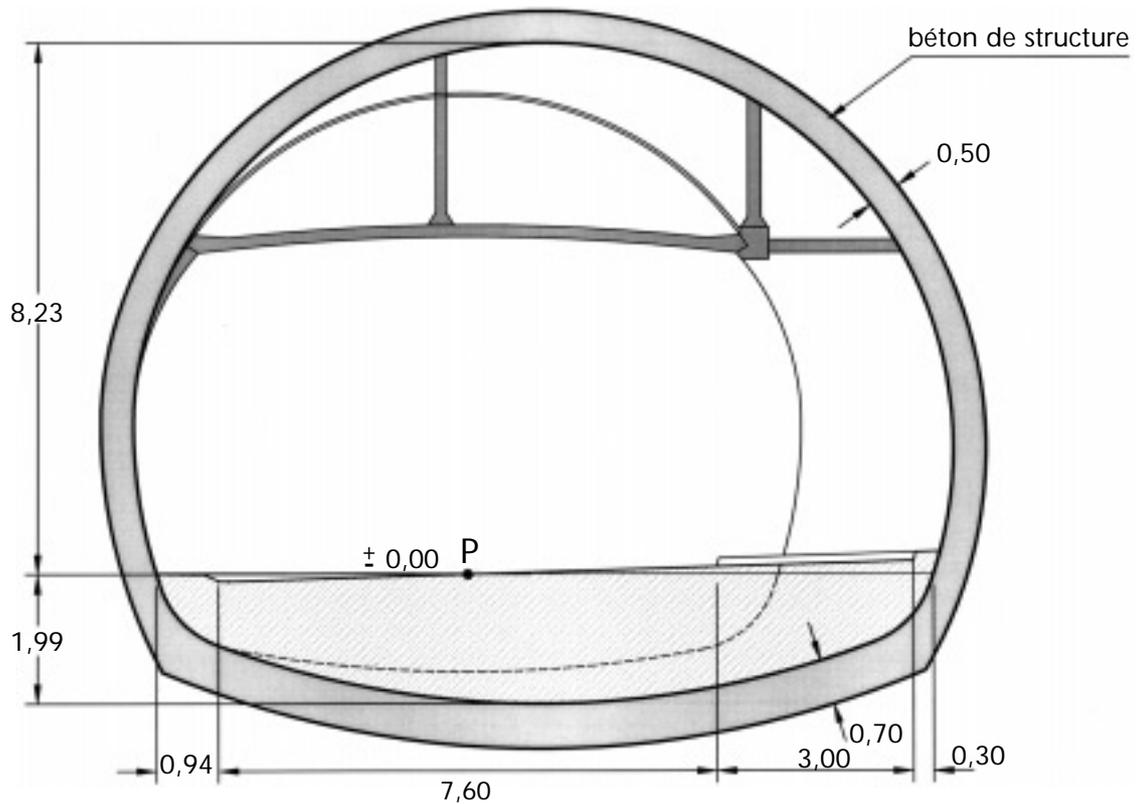
4.2 - Garages et niches

Les garages latéraux en tunnel, bien qu'assez rares, peuvent présenter un intérêt pour l'utilisateur et l'exploitant (figure 4.3).

Si cette disposition est retenue en complément ou

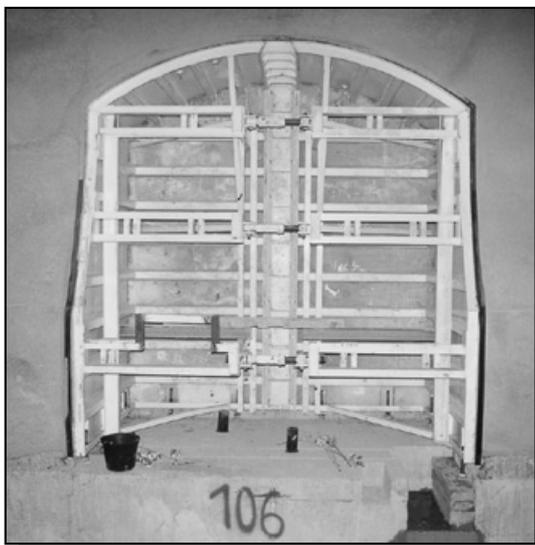
substitution aux galeries de retournement ou de jonction entre tubes parallèles, elle nécessite une sur largeur telle que la structure principale du tunnel doit être modifiée. La surexcavation s'accompagne d'un dimensionnement en conséquence de la voûte et de son revêtement.

Une adaptation doit alors être apportée aux galeries de ventilation (cloisons de séparation et faux plafond).



▲ Fig. 4.3

Garage latéral (Tunnel de Toulon)



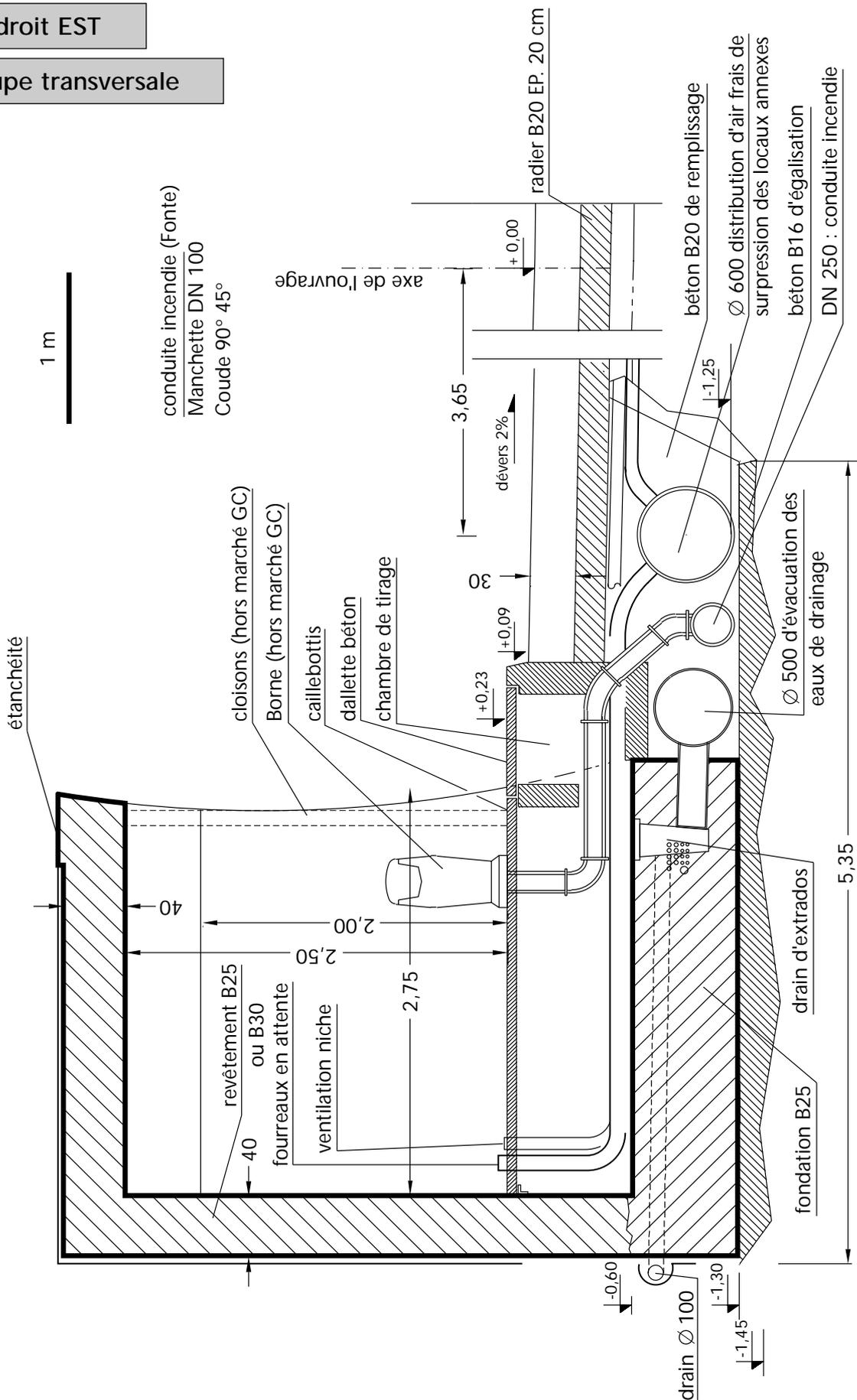
Coffrage de niche de sécurité



Garage VL

Piédroit EST

Coupe transversale



▲ Fig. 4.4.a

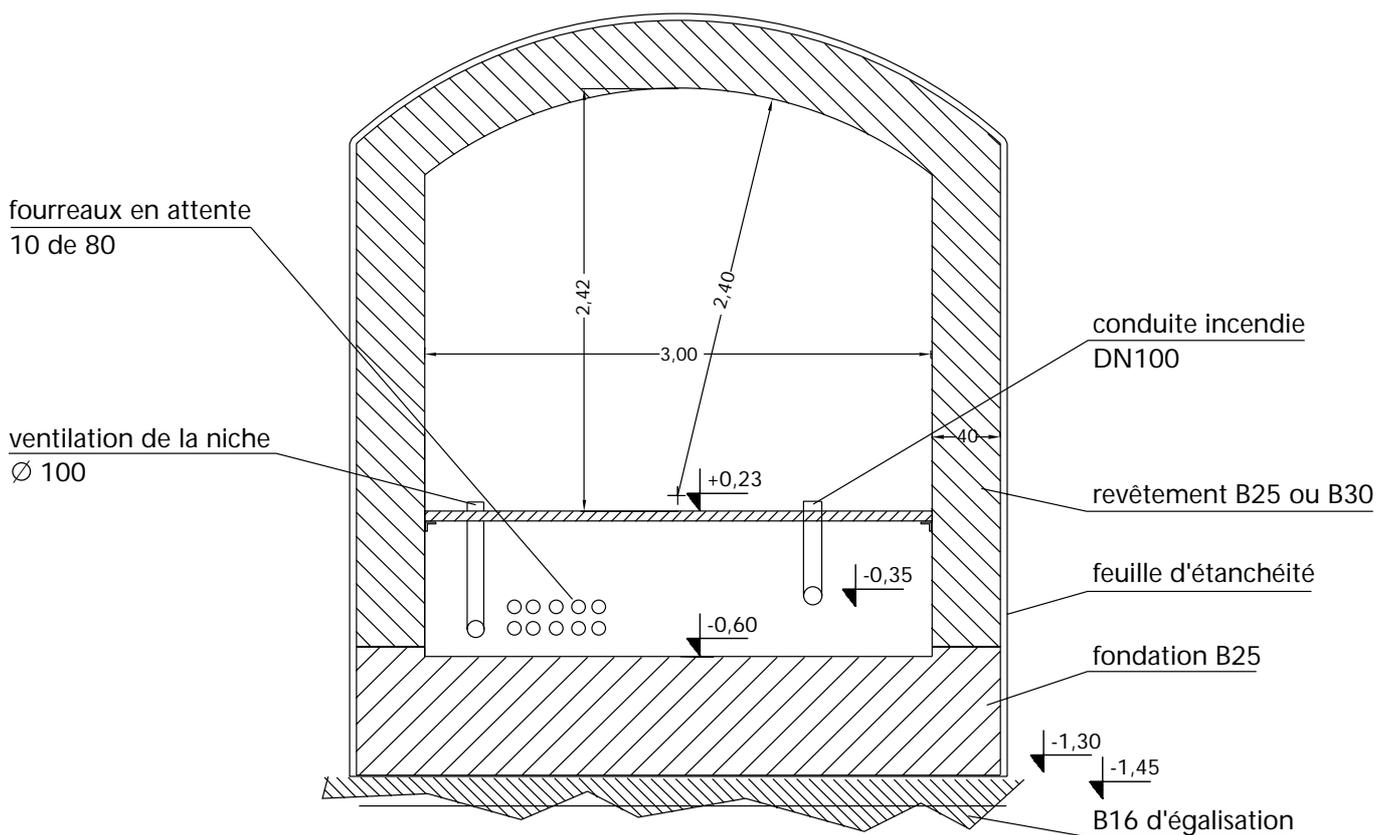
Coupe en piédroit Est - Niche de sécurité et regard de tirage de câbles
(RN 134 - Tunnel du Somport)

Les niches de sécurité (figure 4.4.) doivent recevoir les équipements de premier secours, et permettre à l'utilisateur d'y séjourner dans des conditions acceptables. Le dimensionnement, qui fait souvent l'objet de mises au point avec les représentants des commissions de sécurité, est illustré dans les croquis joints.

Il est certain qu'une tendance à la normalisation reste souhaitable.

On choisit parfois de placer les appareils d'incendie utilisés par les services de secours dans des niches distinctes, des niches de sécurité (exemple sur figure 5a en section 7).

Piédroit EST



▲ Fig. 4.4.b

**Coupe en piédroit Est - Niche de sécurité élévation
(RN 134 - Tunnel du Somport)**

4.3 - Ouvrages fonctionnels extérieurs au tunnel

4.3.1 - Puits et galeries de transit

Liés au choix de la station souterraine, l'implantation d'un puits de ventilation prolongé éventuellement d'une galerie de transit, demande une étude précise de la géologie et de l'hydrogéologie des terrains traversés, et des possibilités d'accès au bâtiment de tête de puits. On peut se référer notamment à l'annexe 4.3 de la section 4 "Procédé de creusement et de soutènement".

Quelques sites favorables peuvent conduire à concevoir des puits inclinés. Exceptionnellement une galerie de pente limitée et accessible à des engins de travaux publics (ou groupés avec un accès de sécurité) peut se révéler plus économique qu'un puits vertical.

On veillera particulièrement aux problèmes d'étanchéité pour les puits faisant transiter l'AF, des problèmes de glaciation pouvant apparaître sous l'effet d'un air très froid (chutes de glaçons pouvant être importantes).

4.3.2 - Stations de ventilation

L'étude de leur implantation et de leur dimensionnement nécessite dès les études préliminaires, une connaissance sérieuse de la géologie et des problèmes posés par l'environnement.

Les volumes à réserver doivent être définis à partir de l'étude de ventilation du tunnel.

Stations souterraines

Ces stations posent des problèmes spécifiques en raison de l'importance de leur section. D'une manière générale, on s'attache à ne les implanter que dans des zones de bon terrain. Le choix de la forme de la section (profil voûté ou piédroits verticaux) et de leur orientation dépend essentiellement de la structure du massif encaissant.

Stations de surface

Leur implantation est en général conditionnée par le parti architectural retenu ou par des questions d'environnement ; on veille à ce que les circuits de raccordement avec le tunnel soient les plus simples possibles et à ce que les dessertes soient assurées. Ces stations doivent être facilement accessibles. L'implantation des baies d'aspiration et des rejets d'air vicié sera étudiée en fonction des servitudes locales (surface, bruit, pollution...).

Bibliographie

- ◆ Arrêté du 30 juin 1983 portant classification des matériaux de construction et d'aménagement selon leur réaction au feu et définition des méthodes d'essais. (Journal Officiel du 1er décembre 1983).
- ◆ Décret n° 57.1161 du 17 octobre 1957 fixant la classification des matériaux et éléments de construction par rapport au danger d'incendie dans les établissements recevant du public. (Journal Officiel du 20 octobre 1957).
- ◆ Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (règles de calcul FB). Cahier du CSTB n° 2188 - livraison n° 382 - octobre 1987. (AFNOR DTU P 92-701)
- ◆ Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier. D T U - Cahier du CSTB 1840 - décembre 1993.
- ◆ Circulaire n° 81-109 du 29 décembre 1981 relative à la sécurité dans les tunnels routiers (Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation -Ministère des Transports).
- ◆ AIPCR Incendies dans les tunnels - Protection du Génie Civil, des circuits électriques et des équipements - Revue ROUTES / ROADS n° 275 de janvier 1992.



Édicule de désenfumage sur tranchée couverte



Exemple de trappe de désenfumage



Exemple de dalle de plafond à l'intérieur d'un tunnel creusé au tunnelier (Tunnel de Caluire)



Dalle de chaussée en cours de réalisation