

3. CONCEPTION ET REMISE EN ÉTAT DES TUNNELS ROUTIERS URBAINS

▶ 3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA CONCEPTION ET LA REMISE EN ÉTAT

3.1.1 Les défis

Un tunnel doit être étudié, ou réétudié, conformément à la réglementation. Sa conception est fortement influencée par l'usage qui est envisagé (ou, en cas de



3. DESIGN AND REFURBISHMENT OF URBAN ROAD TUNNELS

▶ 3.1 GENERAL ASPECTS RELEVANT FOR DESIGN AND REFURBISHMENT

3.1.1 Challenges

A tunnel has to be (re-)designed in accordance with legislation and the design is strongly influenced by the expected and desired use (or, in case of refurbishment,



remise en état, son utilisation effective). Dans le cadre des possibilités d'utilisation ainsi que de la réglementation, des choix sont opérés parmi les solutions réalisables sur le plan de la conception et de l'exploitation. Sur ces critères, et sur la base des recommandations nationales et, s'il y a lieu, internationales, le bureau d'études doit dresser la liste des équipements et des installations qui sont soit nécessaires, soit éminemment souhaitables.

Au début de l'étude, un document spécifique peut décrire tous les équipements du tunnel relatifs à la sécurité. Il peut aussi définir les risques d'événements anormaux, les répertorier par type et, si possible, faire une évaluation des risques en termes de fréquence et de conséquences.

Utilisation

L'utilisation d'un tunnel routier urbain est différente de celle d'un tunnel non urbain. Il est conseillé de toujours la définir en tenant compte du réseau routier et de l'infrastructure environnante.

Les spécificités liées à l'utilisation d'un tunnel urbain et du réseau routier auquel il appartient sont typiquement les suivantes :

- transport de marchandises dangereuses : dans bien des cas, on autorise moins de marchandises dangereuses dans les tunnels routiers urbains que dans les tunnels routiers non urbains. Mais les camions qui transportent ces marchandises et qui empruntent le tunnel présentent un plus grand risque en termes de conséquences pour le voisinage s'ils sont impliqués dans un accident (incendie, explosion, vapeurs toxiques) ;
- beaucoup plus de véhicules de transport en commun avec de nombreux voyageurs ;
- différences entre la limitation de vitesse à l'intérieur du tunnel et la limitation sur les voies urbaines de raccordement en amont et en aval du tunnel, ce qui agit négativement sur le comportement des conducteurs et entraîne des bouchons ;
- trafic plus dense provoquant des bouchons occasionnels ;
- structure pendulaire du trafic journalier provoquant des bouchons dans un certain sens ;
- bouchons plus nombreux en cas de problèmes : non seulement sur la route où se trouve le tunnel, mais aussi sur les voies d'accès en amont du problème ;
- des incidents minimes peuvent avoir des effets secondaires beaucoup plus importants en raison de l'imbrication des voies urbaines environnantes.

La prise en compte de ces spécificités pendant la phase d'étude peut conduire à prendre la décision soit d'intégrer dans la conception des mesures pour

actual use) of the tunnel. Within the possibilities and restrictions of use and legislation, choices are made based upon a consideration of possible solutions in design and in operation. On these criteria, the design team must compile a list of equipment and facilities that is (a) necessary and (b) highly desirable, based on national and, if appropriate, international guidelines.

At the very beginning of the design, a specific document may describe all tunnel installations related to safety, define the risks of abnormal events, classified by type and if possible include Risk Assessment in terms of frequency and consequences.

Use

The use of an urban road tunnel is different from that of non-urban highway tunnels. The use of an urban road tunnel should always be considered in conjunction with the use of the road network and the surrounding infrastructure.

Typical features connected with the use of an urban road tunnel and its road network are:

- dangerous goods transport: in many cases, in urban road tunnels, less dangerous goods are allowed than in highway tunnels. However, dangerous goods vehicles that do drive through the tunnel pose a greater risk in terms of consequences for the neighbourhood if these vehicles are involved in an accident (fire, explosion, toxic fumes);
- considerably more public transportation, carrying many passengers;
- speed limit differences between the road in the tunnel and the connecting urban and highway networks both upstream and downstream from the tunnel, having an adverse effect on driver behaviour and leading to congestion;
- more traffic causing occasional congestion;
- tidal flow nature of the daily traffic, causing congestion in specific directions;
- more widespread congestion effects when problems do arise: not only the road on which the tunnel is situated, but also the connecting road networks upstream from the problem;
- minor incidents can have much wider secondary effects due to the combination of highway and urban networks.

Considering these features during the design phase may lead to a decision either to include measures in the design aimed at avoiding adverse effects either to



corriger les effets négatifs, soit de prendre en compte les effets réels s'il n'est pas possible de réduire ceux-ci ou de les supprimer.

Ainsi, les autobus et autocars peuvent présenter des difficultés particulières pour l'exploitation d'un tunnel si leurs spécificités n'ont pas été prises en compte durant la phase d'étude du tunnel. En effet, ces véhicules nécessitent un équipement spécial de dépannage et de remorquage ; de plus ils peuvent transporter jusqu'à une centaine de personnes. Plus que les voitures de tourisme, les autobus et autocars transportent des personnes âgées ou à mobilité réduite, ce qui pose des problèmes en cas d'évacuation. La prise en compte, lors de l'étude d'un tunnel, du rôle des autobus peut donc avoir un effet sur la géométrie du tunnel (pour permettre l'accès des véhicules spéciaux de dépannage ou de remorquage) et sur les voies d'évacuation.

Certaines spécificités des tunnels routiers urbains peuvent influencer sur le niveau et/ou la fréquence de congestion de la circulation. En voici quelques exemples :

- la largeur de la chaussée, qui peut (ou peut ne pas) permettre de maintenir la capacité d'absorption de trafic du tunnel, même si un véhicule est arrêté à l'intérieur ;
- le nombre des issues de secours, qui est étroitement lié au nombre d'utilisateurs présents dans le tunnel ;
- les conditions de fonctionnement de la ventilation en cas d'incendie avec un bouchon à l'intérieur du tunnel.

Le tunnel par rapport à la zone urbaine environnante

L'implantation d'un tunnel dans une zone fortement urbanisée fait peser de nombreuses contraintes sur sa conception :

- problèmes évidents par rapport au choix de l'implantation : on peut concevoir un tunnel qui réponde à toutes les règles de sécurité et de performances, mais qui soit tout simplement impossible à inscrire physiquement dans la ville. En effet, les abords des têtes de tunnel sont parfois réduits et il peut ne pas y avoir assez de place pour stocker les véhicules et les contenir pendant un incident dans le tunnel. Les tunnels sous-fluviaux ont des profils en long qui entraînent des variations de vitesse dans les différentes parties du tunnel. Cela accroît le risque de voir des véhicules tomber en panne dans un bouchon ;
- la construction d'un tunnel dans un sol mou peut ébranler les fondations des bâtiments voisins ;
- les exigences liées à l'évacuation des fumées, aux structures nécessaires au rejet des gaz d'échappement et au bruit peuvent poser problème dans une zone sensible ;

take into account the real effects of the features if it is not possible to reduce or counteract them.

Buses, for example, can pose particular difficulties for tunnel operation if their specific role is not taken into account during tunnel design. They require special equipment for breakdown recovery and towing. They also can carry up to one hundred people. Passengers may, more so than in regular cars, be elderly and/or have mobility difficulties, which has consequences for their abilities and speed in case there is a need for escape. During the design of a tunnel, considering the role of buses may therefore have an effect on the design of both the tunnel geometry (to allow for special repair or towing vehicles) and the escape routes.

Some specific features of urban road tunnels may influence traffic congestion in term of level and/or frequency. Examples of these features are:

- the width of the carriageway, which can (or can not) allow to keep the traffic volume capacity of the tunnel even if a vehicle is stopped inside;
- the number of emergency exits, that is closely connected to the number of present users in the tunnel;
- the operating requirements of ventilation in case of fire with congestion inside the tunnel.

The tunnel in relation to the urban area

Situating a tunnel in a densely developed urban area creates a lot of pressure on the design:

- the obvious problems in relation to location: if one designs a tunnel that meets all rules and regulations for safety and efficiency, it may simply be physically impossible to fit it in in the city. Portal approaches may be short due to this and there may be a lack of space for marshalling and holding vehicles during an incident in the tunnel. Underwater tunnels may necessarily have long sag curve vertical alignments, causing differences in driving speed in different parts of the tunnel, and increasing the chance of vehicle breakdowns during congestion;
- the disturbance of foundations of nearby buildings caused by building a tunnel in soft soil conditions;
- the requirements of exhaust smoke and of exhaust surface structures and noise in a sensitive area;



- si des immeubles doivent être rachetés en vue de leur démolition, cela suscite généralement une résistance plus ou moins forte de la part de leurs propriétaires. En zone urbaine, il n'est pas rare d'avoir à négocier avec (beaucoup) plus de propriétaires et de disposer d'un nombre d'options plus restreint. De surcroît, le prix des terrains est plus élevé ;
- le souhait logique des habitants et des administrations de construire des logements au-dessus d'un tunnel (terrestre) entraîne pour ceux qui habitent à cet endroit des risques supplémentaires en cas de catastrophe ;
- il faut traiter la sécurité des usagers dans le tunnel mais aussi la sécurité des personnes qui se trouvent dans les environs immédiats : il est conseillé d'analyser des scénarios du type explosion ou gros incendie pour étudier leurs conséquences et les moyens permettant d'en atténuer les effets ;
- influence des constructions contiguës : le niveau de sécurité du tunnel peut être suffisamment élevé en soi, mais s'avérer insuffisant dès lors que l'on autorise la construction d'immeubles qui jouxtent le tunnel ou sont même construits à la verticale de celui-ci ;
- grande diversité du trafic, depuis le trafic local et de proximité jusqu'au trafic de transit, souvent combiné avec le trafic des heures de pointe dont la direction est opposée le matin et le soir. Dans certains cas, des tubes (ou des voies) affectés alternativement à un sens et l'autre peuvent constituer une solution pour un trafic pendulaire ;
- intégration dans le système d'exploitation du réseau existant, avec l'étude des bretelles d'accès et de sortie ;
- le réseau routier, en amont et en aval du tunnel, est susceptible d'être beaucoup plus complexe que dans le cas d'un tunnel non urbain. En raison de cette complexité le trafic entrant peut aborder le tunnel par vagues et non en flot continu, tandis qu'en aval de la tête de sortie, le débit du trafic sortant peut être interrompu.

Congestion

Comme on l'a vu plus haut, les spécificités liées aux caractéristiques du trafic et à l'emplacement d'un tunnel routier urbain entraînent des bouchons fréquents si elles ne sont pas prises en compte durant la phase d'étude.

Il est souhaitable d'empêcher ou de réduire le plus possible un bouchon dans un tunnel, car :

- cela altère très vite la qualité de l'air dans le tunnel ;
- les moteurs des véhicules peuvent chauffer et provoquer des pannes, surtout dans les tunnels à fortes et longues pentes ;
- un séjour prolongé dans l'enceinte du tunnel peut stresser les occupants des véhicules et les rendre claustrophobes ;

- if there is a need to buy and demolish property, it usually causes some or a lot of resistance among the present owners. In an urban area one is likely to have to deal with (many) more owners and have less alternatives to choose from. Also, the land values are higher;
- the logical desire of inhabitants and administrators to build on the roof of a (land) tunnel, causing additional risks for those located on top of the tunnel during a calamity;
- the balance between the safety of tunnel users and the safety of persons in the immediate surroundings. In relation to this, scenarios such as explosions and large fires should be analysed for consequences and possible means of alleviating the effects;
- the influence from, and upon, (plans for) adjoining constructions. The safety level of the tunnel by itself may be sufficiently high, but when allowing for buildings next to the tunnel or even to be placed on top of the roof, it may not be enough;
- the wide variety of traffic: from local, short-distance, to through traffic, often combined with rush hour traffic in opposing directions morning and evening. In some cases, tidal flow tubes (or lanes) can be a solution;
- integration in the network management traffic system including the design of access and exit ramps;
- the road network, both upstream and downstream from the tunnel, is likely to be a lot more complex than in case of a non-urban tunnel. Entering traffic may approach the tunnel in waves rather than in a continuous stream due to the complexity of the road network upstream from the tunnel. The exiting traffic flow may be interrupted downstream of the exit portal.

Congestion

The specific features connected with the use and location of an urban road tunnel, as discussed before, will result in frequent congestion if they are not considered during the design phase.

Congestion in a tunnel should be prevented or reduced as much as possible because:

- it has a very rapid adverse effect on air quality in the tunnel;
- it may lead to increased vehicle overheating and vehicle breakdowns, especially in tunnels with steep and long slopes;
- prolonged delay within the confines of the tunnel can also induce claustrophobic reaction and stress in vehicle occupants;



- un bouchon peut gêner le passage des véhicules de secours qui se rendent sur le lieu d'un accident, soit dans le tunnel soit dans ses environs, ce qui peut entraîner un retard inacceptable de l'intervention des secours ;
- dans les tunnels à ventilation longitudinale, celle-ci se met en marche en présence de grandes quantités de gaz d'échappement ou en cas d'incendie. En général, le sens est celui du trafic, afin de protéger les gens pris au piège derrière l'accident, en amont de l'incendie. Le trafic en aval peut sortir du tunnel en toute sécurité. Mais en cas de bouchon en aval de l'incendie, les usagers vont s'y trouver piégés et leur situation va empirer si la ventilation est mise en marche (automatiquement). C'est pourquoi l'étude de la ventilation doit tenir le plus grand compte des situations d'incendie en cas de bouchon.



Illustration de la densité de trafic d'un tunnel urbain

- congestion combined with a lack of space can prevent a smooth passage by emergency vehicles to either accidents in the tunnel, or emergencies in the vicinity, resulting in an unacceptably long emergency services response time;
- in tunnels with longitudinal ventilation, the ventilation is switched on in case of large amounts of exhaust fumes or in case of a fire. The direction is usually in the driving direction to protect people trapped behind the accident, upstream from the fire. Traffic downstream can safely drive out of the tunnel. In case of a congestion downstream from the fire, people will be trapped there. Their situation will worsen if ventilation is (automatically) switched on. It is the reason why the ventilation design has to take very carefully into account fire events in case of congestion.



Example of traffic density in an urban tunnel

3.1.2 Recommandations concernant la conception et la remise en état

Gestion du trafic et des interventions

- Il est conseillé que la différence de limitation de vitesse avec le réseau routier amont soit être la plus faible possible. De même, pour éviter la formation de bouchons dans le tunnel, il est préférable que la limitation de vitesse en aval du tunnel ne soit pas inférieure à celle qui est imposée en amont.
- Il est recommandé d'intégrer la probabilité de congestion dans l'analyse des besoins de ventilation.

3.1.2 Recommendations for design and refurbishment

Traffic and intervention management

- Speed limit differences on the upstream road network should be kept to a minimum. Also, the speed limit on the roads downstream from the tunnel should preferably not be lower than the speed(s) upstream to avoid congestions in the tunnel;
- include the likelihood of congestion in the analysis of ventilation requirements;



- De même il est recommandé d'intégrer la probabilité de pannes des véhicules dans la conception de la chaussée, afin de maintenir la capacité d'absorption de trafic même si un véhicule est bloqué à l'intérieur du tunnel.
- La géométrie et l'infrastructure du réseau devraient être étudiées de manière à éviter la formation de bouchons dans le tunnel (on trouvera dans la partie suivante des recommandations propres à la géométrie et à l'infrastructure).
- Il est souhaitable d'intégrer des mesures permettant de maintenir la sécurité en cas de bouchons.
- Il est recommandé de prendre des mesures adaptées à une gestion efficace et proactive du trafic, par exemple la fermeture rapide des voies pour permettre le passage des véhicules de secours.
- Il est souhaitable que la conception intérieure évite tout sentiment de claustrophobie ou d'angoisse aux usagers du tunnel
- Pour limiter le nombre des incidents et des bouchons, il est recommandé d'utiliser le plus efficacement possible les systèmes de régulation du trafic modernes, et cela sur une zone étendue.

Optimisation des coûts sur la durée de vie

Dès le début du projet, le coût d'exploitation d'un tunnel devrait être pris en considération lors des choix d'investissement. Un petit investissement supplémentaire dans le projet initial peut permettre d'économiser beaucoup d'argent et de gêne pour l'entretien et l'exploitation. Par conséquent, pour choisir parmi les différentes solutions possibles, le maître d'ouvrage doit prendre en compte non seulement le coût d'investissement, mais aussi le coût de l'entretien (y compris la gêne causée aux usagers et au grand public par les travaux d'entretien).

En général, ce sont les spécificités de la situation qui dictent les priorités choix. Considérons, par exemple, les deux aspects suivants : le rôle du tunnel dans le réseau existant et la nature du trafic :

- un tunnel peut être situé dans un réseau routier complet avec un nombre suffisant de déviations possibles. Dans un autre cas, il peut s'agir d'une liaison stratégique permettant de franchir un obstacle physique, sans autre itinéraire possible ;
- le trafic peut présenter des fluctuations importantes selon un cycle journalier ou hebdomadaire, mais il peut aussi être relativement constant avec un niveau élevé 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Et tous les types de conditions intermédiaires sont possibles.

Dans le cas d'un tunnel pour lequel il n'y a aucun itinéraire de rechange satisfaisant et qui connaît un trafic constamment élevé, l'incidence de l'entretien sur le trafic peut être si forte que des investissements supplémentaires substantiels sont inévitables dans le projet initial.

- include the likelihood of failures in the design of the carriageway so as to keep the traffic volume capacity even if a vehicle is stopped inside the tunnel;
- design the network geometry and infrastructure so as to avoid congestion in the tunnel (specific recommendations for geometry and infrastructure will be given in the next section);
- include measures to maintain safety in the presence of congested traffic;
- include adequate measures for effective and pro-active traffic management, e.g. allowing for rapid closure of lanes for passage of emergency services;
- the interior design should be aimed at preventing feelings of claustrophobia or anxiety in tunnel users.
- to limit further escalation of incidents and the growth of congestion, it is recommended that best use be made of modern, computerized, wide-area traffic control systems.

Whole life costing optimisation

From the start of the project, the cost of operation of a tunnel should be taken into consideration when making investment choices. A small extra investment in the initial plan may save a significant amount of money and inconvenience for maintenance and operation. Consequently, the owner has to consider the balance of investment cost for design solutions on the one hand, and maintenance cost (including inconvenience for the users and the general public resulting from maintenance activities) on the other.

The specific situation will usually set the priorities. Consider, for example, these two dimensions: the function of the tunnel in the road network and the traffic pattern:

- a tunnel may be situated in a comprehensive route network with sufficient route options. On the other hand, it may be a strategic link to cross a physical barrier, with no other available route alternative;
- traffic may conform to a clear pattern on a daily or weekly cycle, or it may be fairly constant with a high level of demand 24*7. All kinds of intermediate conditions are possible.

In case of a tunnel with no suitable (safe) alternative route and constantly high traffic intensity, the impact of maintenance on traffic may be so large, that substantial additional investments are inevitable in the initial project.



Choix de conception et documentation

Apartir de tous ces éléments, on opère des choix pour les solutions de conception et de construction et pour l'organisation devant gérer le tunnel. Durant ce processus, il est vivement recommandé de consulter les exploitants de tunnels similaires existants, afin de tirer des enseignements de leurs expériences respectives.

Dans ce processus, il est crucial que tous les choix soient documentés avec des rapports d'analyse. Il est également conseillé, en vue des améliorations futures, de conserver les critères d'étude de base ainsi que les niveaux de seuil, et notamment l'identification des systèmes vitaux et la fonctionnalité requise de chacun d'eux. Plus un tunnel routier urbain et ses équipements sont complexes, plus il est important de veiller à ce que les manuels d'exploitation et d'entretien soient détaillés et le personnel convenablement formé. Ainsi, l'exploitant du tunnel peut consulter toutes les informations pertinentes, par exemple pour l'entretien et la rénovation, même des dizaines d'années après l'ouverture du tunnel à la circulation.

Recommandations complémentaires

Pour des recommandations complémentaires sur la réduction du coût d'exploitation à l'intention des concepteurs de tunnels, voir le rapport de l'AIPCR [3].

► 3.2 CONCEPTION INITIALE

3.2.1 Les défis

Géométrie et infrastructure

En général, les premiers choix à faire lors de la conception d'un tunnel concernent le tracé de l'itinéraire (tunnel compris), la géométrie de l'ouvrage (nombre de tubes, nombre de voies de circulation, grandes lignes du profil en long, chemins d'évacuation et moyens d'accès pour les sauveteurs). Ils concernent aussi les cheminements internes et externes (y compris, au besoin, l'accès et les voies d'accès pour les secours et l'entretien ainsi que les itinéraires de déviation du trafic).

Lors de ces choix, les points suivants devraient être pris en compte :

- itinéraires permettant aux services de secours d'atteindre leur destination :
 - dans le tunnel ou sur les accès et dans les zones qui ne peuvent être atteintes que par le tunnel,
 - en situation normale et pendant les opérations d'entretien du tunnel,
 - compte tenu de la probabilité de bouchon sur l'ensemble de l'itinéraire, tunnel compris ;

Design choices and documentation

Based upon all of this, choices are made for designing and building solutions, and about the organization for managing the tunnel. It is strongly recommended that operators of existing similar tunnels are consulted during this process in order to learn from their experience.

In this process, it is critical that all decisions are documented along with analysis reports and other documentation used when making the decisions. The basic design criteria and threshold levels for future improvements should also be recorded. This should include the identification of vital systems and the required functionality for each of them. The greater complexity of an urban road tunnel and its tunnel equipment makes it more important to ensure that operation and maintenance manuals are accurately detailed and staff is properly trained. This allows for the tunnel operator to retrieve all relevant information, e.g. for maintenance and renovation, even decades after opening the tunnel for traffic.

More recommendations

For more recommendations on reduction of operational cost to tunnel designers, see PIARC report [3].

► 3.2 INITIAL DESIGN

3.2.1 Challenges

Geometry and infrastructure

The first design decisions to be made usually involve the route of the road (including a tunnel), the geometry of the construction (number of tubes, number of traffic lanes, rough longitudinal section, escape routes and means of access for rescue services) and the internal and external infrastructure (including, if necessary, access and access roads for rescue services and maintenance, and roads for diverting oncoming traffic in case of incidents).

When making these decisions, the following issues should be taken into account:

- the possibilities for emergency services to reach their destinations:
 - both in the tunnel or on the road and in areas that can be reached only through the tunnel,
 - in the normal situation and during tunnel maintenance,
 - taking into account the likelihood of traffic congestion on the entire route including the tunnel;



- existence (ou pas) d'une déviation acceptable et capacité d'absorption de trafic de cet itinéraire de substitution ;
- possibilité ou impossibilité de fermer une voie plutôt que la totalité du tube du tunnel pour des travaux d'entretien, par exemple la nuit ;
- conditions d'intervention du personnel ;
- moyens d'accès possibles pour les techniciens d'entretien et leur matériel (parfois très lourd et encombrant) ;
- fréquence prévisionnelle des incidents et accidents. Les incidents et accidents qui bloquent une ou plusieurs voies de circulation provoquent, assez souvent, un bouchon. De fait, il est conseillé si possible, de viser à réduire d'abord la fréquence prévisionnelle des incidents ("mieux vaut prévenir que guérir"), puis la gravité de leurs conséquences.

D'ordinaire, les tunnels situés sur des routes interurbaines ont des accès et des sorties avec des conditions de circulation généralement fluides. Si cette situation est souhaitable pour tous les tunnels, elle est cependant rarement possible pour les tunnels urbains en raison de la proximité de carrefours et/ou d'autres caractéristiques physiques du réseau.

Il est souhaitable de prévoir des voies d'accès séparées et protégées menant directement à la tête de tunnel et de les maintenir dégagées en vue de leur utilisation par l'exploitant du tunnel et les services de secours.

Génie civil – Equipements

Une fois que la géométrie et l'infrastructure sont fixées, l'étape suivante consiste à étudier le génie civil et les besoins en équipements.

Chaque tunnel devrait présenter un degré élevé de sécurité pour les usagers et les différents services d'intervention. Des aménagements particuliers sont exécutés à cet effet. En outre, les tunnels sont dotés d'équipements de sécurité qui visent d'une part à réduire l'apparition de situations d'urgence et d'autre part, si une telle situation se produit, à assurer le maximum de protection aux personnes concernées. Il est possible d'intégrer certains dispositifs de sécurité tels que voies d'évacuation, accès pour les secours, etc. dans la conception initiale, mais ils sont beaucoup plus difficiles à ajouter après coup. Par conséquent, il est conseillé d'étudier soigneusement ces dispositifs dans une approche de concept global de la sécurité du tunnel.

En raison des difficultés liées à la fermeture d'une voie ou d'un tube du tunnel (bouchon, attente, déviation, déplacement plus long en temps et en distance), l'étude des équipements du tunnel devrait viser, autant que faire se peut, à réduire le plus possible les situations de fermeture. Cela vise à réduire fortement :

- the availability of a reasonable alternative route (or lack thereof) and the capacity (risk of traffic congestion) of this alternative route;
- the possibility or impossibility of lane closure rather than full tube closure of the tunnel for maintenance, e.g. during the night;
- the circumstances or restrictions that determine personnel safety;
- the possible means of access for maintenance personnel and their (sometimes very heavy and large) equipment;
- expected incident and accident frequency: incidents and accidents blocking one or more traffic lanes cause, at the least, congestion. Measures should, if possible, firstly be aimed at reducing the expected incident frequency ('better to prevent than to cure'). Secondly, at reducing the severity of the consequences.

Tunnels on inter-urban routes usually have long uninterrupted approaches and exits with normally free-flowing traffic conditions. This is desirable for all tunnels but is often not possible in urban tunnels due to the proximity of junctions in the network and/or other physical features.

Separate protected access routes direct to the tunnel portal should be provided and kept clear for the use of the tunnel operator and support services.

Civil engineering and equipment

When the geometry and infrastructure are laid down, the next step is to formulate civil design and the requirements of equipment and installations.

Every tunnel should ensure high degree of safety for road traffic participants. Special construction work is carried out for this purpose. In addition, safety equipment having the main objective to reduce the risk of occurrence of emergency situations is installed in tunnels, and to ensure maximum possible protection for persons participating in this situation if such an event occurs. Some safety measures, such as escapeways, entrances for rescue teams, etc. can be included in the initial design but will be much more difficult to add afterwards. These construction elements should therefore be carefully designed in connection with the whole safety concept of the tunnel.

Due to the difficulties connected with closing a tunnel lane or tube (traffic congestion, delay, diversion, additional journey time and distance), the design of tunnel equipment should, as much as reasonably possible, be aimed at minimizing the necessity of closure. This means minimizing:



- la fréquence des interventions d'entretien,
- l'emprise sur l'espace circulé nécessaire à l'exécution de l'entretien,
- le temps nécessaire pour réaliser les opérations d'entretien,
- la probabilité d'incidents et accidents nécessitant la fermeture d'une voie ou d'un tube.

3.2.2 Recommandations générales concernant la conception initiale

Les recommandations qui suivent ne sont pas propres aux tunnels routiers urbains, mais elles sont particulièrement importantes pour ces derniers.

Réduction de la congestion

- Fixer le nombre de voies en fonction de prévisions de trafic réalistes (en raison de la situation urbaine, la modification de la géométrie et de l'infrastructure d'un tunnel existant est encore plus difficile dans un tunnel routier urbain que dans d'autres types de tunnels).
- Ne pas réduire le nombre de voies de circulation à l'intérieur ou juste en aval du tunnel.
- L'affectation de tubes ou de voies au sens le plus chargé peut être une solution en cas de trafic pendulaire.
- Si possible, éviter les bretelles d'accès et de sortie à l'intérieur ou à proximité du tunnel. Si elles sont inévitables, il faut les étudier très soigneusement.
- Si de fortes pentes sont inévitables, envisager d'affecter une ou plusieurs voies exclusivement aux poids lourds.
- Éviter de placer un nombre excessif de panneaux sur une courte distance, car cela perturbe les usagers.



Utilisation alternative d'une voie centrale, dans un sens de circulation, puis dans l'autre sens, pour un tunnel urbain avec un fort trafic pendulaire

- the necessary frequency of maintenance;
- the road space required to execute maintenance;
- the time required to execute maintenance;
- the probability of incidents and accidents requiring lane or tube closure.

3.2.2 General recommendations for initial design

The recommendations below are not specific for an urban road tunnel, but for an urban road tunnel the items that they are aimed at are especially important.

Reduction of congestion

- Base the number of lanes upon realistic traffic intensity forecasts (due to the urban situation, changes in an existing tunnel geometry and infrastructure are even more difficult in an urban road tunnel than in other tunnel types);
- do not reduce the number of traffic lanes in or just downstream from the tunnel;
- tidal flow tubes or lanes may be a solution in case of tidal flow traffic;
- where possible, avoid access and exit junctions in or near the tunnel. If these are inevitable, give very careful consideration to the design;
- if steep inclinations are inevitable, consider assigning one or more traffic lane(s) exclusively for heavy goods vehicles;
- avoid placing too many signs on a short stretch of road since this confuses the drivers.



Utilisation alternative d'une voie centrale, dans un sens de circulation, puis dans l'autre sens, pour un tunnel urbain avec un fort trafic pendulaire



Illustration d'une situation à éviter : une bretelle d'entrée à l'intérieur d'un tunnel

Réduction de la fréquence des incidents

- Si possible, éviter la circulation bidirectionnelle dans un tube de tunnel, afin d'empêcher les collisions frontales.
- Envisager d'intégrer dans la conception de la chaussée du tunnel des glissières de sécurité, de manière à gêner la circulation le moins possible.
- Lors de l'étude du tracé de l'ouvrage et de la route le comprenant, créer un environnement homogène, prévisible et compréhensible sans ambiguïté pour les usagers. Cela vise à favoriser le comportement attendu de la part des usagers et à réduire ainsi la fréquence des incidents.
- Éviter les bretelles en forte pente, car, en sortie, elles augmentent la fréquence de pannes, surtout lorsqu'il y a aussi un bouchon.

Réduction des effets des incidents

- S'il n'existe aucun autre moyen d'accès pour les véhicules de secours, envisager la construction près des têtes du tunnel d'entrées réservées exclusivement aux services de secours pour faciliter leur accès.
- Envisager l'intégration de bandes dérasées pour prévenir ou réduire les bouchons causés par des véhicules en panne et permettre aux sauveteurs de dépasser un trafic arrêté.
- Veiller à ce que la capacité des dispositifs d'évacuation, depuis l'intérieur du tunnel jusque et y compris l'endroit où arrivent les usagers qui ont été évacués, soit suffisante pour le nombre de personnes à prendre en charge en zone urbaine (fort trafic et autobus transportant de nombreux passagers).
- Prévoir le tunnel avec un espace suffisant pour rassembler et contenir les véhicules pendant le déroulement d'un incident dans le tunnel.



Illustration d'une situation à éviter : une bretelle d'entrée à l'intérieur d'un tunnel

Reduction of incident frequency

- Avoid, where possible, bi-directional traffic in one tunnel tube, to prevent head-on collisions;
- consider including crash barriers in the tunnel road design, that they hamper other traffic as little as possible;
- when designing the infrastructure and road layout, aim at a constant, predictable, orderly and unambiguous situation for the driver, favouring the desired driver behaviour and thereby reducing incident frequency;
- avoid steep ramps, because frequency of breakdowns rises with steep exit ramps, particularly when congestion is also present.

Reduction of incident effects

- To facilitate the entrance by emergency service, if other means of passage for rescue vehicles are impossible, consider constructing special entranceways near the portals exclusively for the use of emergency services;
- consider including a hard shoulder to prevent or reduce congestion by broken down vehicles and to enable rescue services driving past congested traffic;
- make sure the capacity of the entire escape route, from the road in the tunnel up to and including the location where escaped tunnel users arrive, is sufficient for the larger amount of people to be expected in the urban situation (traffic intensity and public transport vehicles carrying a lot of passengers);
- the tunnel should be designed with adequate space for marshalling and holding vehicles during an incident in the tunnel.



Réduction de la fréquence et de la durée de l'entretien

Géométrie et infrastructure

- Lorsqu'il faut trois voies ou plus par sens, se poser la question de construire trois tubes (dont un pour la circulation pendulaire alternée) ou quatre tubes au lieu de deux).
- Lorsque deux voies par sens suffisent, mais qu'il n'existe pas d'itinéraire de déviation, prévoir des tubes suffisamment larges pour permettre soit une circulation bidirectionnelle sans danger, soit l'entretien sur une voie et la circulation sur l'autre.
- Se poser la question d'intégrer dans la conception du tunnel un tube séparé pour l'entretien et l'évacuation. Dans certains cas, par exemple un tunnel ne comportant qu'un seul tube de circulation, il peut même être judicieux d'adapter ce tube pour l'accès des secours.

Emplacement des équipements

- Ne pas placer dans l'espace circulé des équipements qui nécessitent un entretien fréquent.

Reduction of frequency and duration of maintenance

Geometry and infrastructure:

- when three or more lanes per direction are needed, consider making three (including one for tidal flow) or four tunnel tubes instead of two;
- when two lanes per direction suffice but there is no reasonable alternative route, make the tunnel tubes sufficiently wide to allow for either safe bi-directional traffic or maintenance on one lane, and traffic on the other;
- consider including a separate maintenance and escape tube in the design. In some cases (e.g. tunnel consisting of only one traffic tube), it may even be sensible to make this tube suitable for access by the emergency services.

Position of equipment:

- do not place equipment and installations that need maintenance on a frequent basis, in the road space;



- Placer les équipements qui doivent être situés en hauteur (éclairage, signalétique et caméras de vidéosurveillance) de manière à ce que l'entretien soit possible en ne fermant qu'une seule voie.
- Disposer toutes les armoires de commande et de distribution dans des niches protégées, où l'entretien peut être effectué sans fermeture de voies.
- Disposer les équipements tels que les ventilateurs principaux et les armoires électriques associées pour qu'ils soient accessibles depuis l'extérieur sans qu'il soit nécessaire de pénétrer dans le tunnel.
- La plupart des équipements devraient être placés dans la galerie de secours ou dans un autre endroit sûr, s'il en existe, plutôt que dans l'espace circulé. Le concept général consiste à répartir les équipements en cantons, dans le but de limiter (localement) l'effet d'un incendie sur le fonctionnement normal des installations.

Choix et conception des équipements

- Dans toute la mesure du possible, concevoir les équipements dans une optique "prêt à l'emploi" (« plug and play »).
- Tous les équipements présents dans un tunnel devraient être faciles à réparer ou à remplacer en cas d'accident.
- Opter pour une solution durable et robuste nécessitant un entretien peu fréquent et/ou de courte durée, plutôt que pour une solution moins onéreuse mais nécessitant un entretien fréquent et/ou de longue durée.
- Utiliser au maximum des équipements à auto-diagnostic assistés par un système de supervision et d'acquisition de données (« SCADA ») complet.
- Prévoir une redondance suffisante pour permettre la poursuite de l'exploitation en toute sécurité en cas de perte limitée de l'alimentation électrique. Cela impose de définir ce qu'est une "exploitation en toute sécurité". Tous les équipements critiques pour la sécurité devraient être doublés par une alimentation électrique de secours parfaitement adaptée à leurs besoins.

La liste qui précède ne donne que quelques exemples et n'est pas exhaustive. Ces recommandations s'appliquent à tous les éléments constructifs du tunnel et à ses équipements, y compris ceux qui sont mentionnés dans la partie qui suit.

Par ailleurs, l'*annexe B, page 100* décrit la démarche tchèque consistant à concevoir systématiquement les équipements conformément aux catégories de tunnels et aux réglementations de l'Union européenne et nationales.

- position equipment that needs to be located overhead (such as lighting, signing, and CCTV cameras), so that maintenance access is possible closing a single lane only;
- place all distribution and switchgear cabinets in protected niche enclosures, where maintenance can be done without closing lanes;
- position equipment such as main ventilation fans and switchgear so that they are accessible from the surface without the need to enter the tunnel;
- when available, most equipment should be placed in an emergency gallery or other safe place, rather than in the traffic tunnel. The concept is to divide installations into sections, with the intention of (locally) restricting the effect of fires on the normal functions of installations.

Selection and design of equipment:

- design equipment in a "plug and play" fashion as much as possible;
- all elements and equipment in a tunnel should be easy to repair or replace when an accident occurs;
- choose a durable and robust solution that requires low frequency and / or time-saving maintenance rather than a less expensive solution that requires frequent and / or time-consuming maintenance;
- use as much as possible self-diagnostic equipment supported by a comprehensive SCADA⁶ system;
- build in sufficient redundancy to allow continuing safe operation following limited failure. This makes it necessary to define the limits of 'safe operation'. All safety-critical equipment should be supported by emergency and backup power supplies most appropriate to the needs of the equipment.

The above list gives only a few examples and is not exhaustive. These recommendations are applicable to all types of construction elements and installations, including those mentioned in the next section.

Appendix B, page 100, in addition, describes the Czech approach to systematically design equipment in accordance with EU and local regulations and tunnel categories.

⁶ SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition



3.2.3 Recommandations pour la conception initiale des éléments de construction et des équipements

Revêtements routiers

Les revêtements bitumineux et le béton peuvent constituer des revêtement adaptés.

Les revêtements bitumineux sont faciles à réparer, à remplacer ou à remettre en état.

Les revêtements de couleur claire permettent non seulement de réduire la facture d'électricité pour l'éclairage, mais aussi d'améliorer l'ambiance intérieure du tunnel aux yeux des usagers.

Pour des recommandations complémentaires, voir aussi l'article de l'AIPCR [4].

Il est recommandé d'éviter d'employer des revêtements poreux, car ils absorbent aisément les matières répandues, dont les carburants, en l'absence d'un nettoyage naturel par la pluie.

Dans les pays froids, les structures en béton doivent être protégées contre le sel de déverglaçage.

Signalisation des issues de secours

Les issues de secours devraient être marquées de manière claire et identifiable par tous les usagers du tunnel. Leur signalisation devrait être visible aussi bien dans des conditions normales que dans les situations d'urgence (fumée). Étant donné que de nombreux usagers des tunnels empruntent ceux-ci fréquemment, avec le temps ils connaissent l'existence et la localisation de ces issues. Des issues de secours visibles permettent aussi d'atténuer l'éventuel sentiment de claustrophobie lorsqu'on est bloqué dans un bouchon à l'intérieur du tunnel.

Pour des recommandations complémentaires, voir le rapport précité [2].

Câbles et fourreaux

Il est conseillé de dimensionner les fourreaux des câbles électriques et de télécommunications avec une réserve suffisante pour faire face aux besoins futurs. Les câbles en fibre optique ne sont pas affectés par les perturbations électromagnétiques et ont une plus grande capacité de transmission. Dans la mesure du possible, il est conseillé d'éviter les raccordements de câbles à l'intérieur du tunnel et d'utiliser des tronçons de câble de la longueur voulue. Tous les câbles devraient être clairement identifiés.

3.2.3 Recommendations for initial design of individual construction elements and installations

Road surfaces

Both asphalt and concrete layers may be suitable types of pavement.

Asphalt layers are easier to repair, and are easily re-paved or refurbished.

Light colors road surface can not only reduce the cost of lighting power supply but also enhance the appearance of the tunnel to the driver.

For more recommendations see also PIARC Article [4].

Avoid applying porous road surfaces, as they will easily absorb spilt materials including fuel, due to absence of natural rain-wash.

In countries with a cold climate, concrete structures have to be protected from de-icing salts.

Escape door signs

Escape doors and signs should be clearly marked and recognizable for all tunnel users. Signs and indications should be visible both in normal conditions and in emergency situations (smoke). Because a large number of tunnel users frequently drive through the tunnel, they will, after a while, know of the existence of these doors, and know where they are. The obvious presence of escape doors may also reduce possible unpleasant feelings connected with being stuck in congestion in the tunnel.

For more recommendation, see the abovementioned report [2].

Cables and ducts

Cable ducts and conduits for energy or communications cables should be dimensioned with adequate spare capacity, to cope with future needs. Fibre optical cables are not affected by electromagnetic interference and have a larger transmission capacity. Avoid as much as possible cable connections inside the tunnel, use cable sections of the appropriate length. All cables should be clearly identified.



En zone urbaine, les besoins de passage pour des câbles sont généralement forts. Un tunnel bien situé peut constituer un moyen économiquement intéressant, et parfois le seul moyen pratique, pour faire passer d'autres réseaux urbains majeurs (eau, électricité, communications, etc.). Dès lors, la fourniture d'une capacité supplémentaire de fourreaux à d'autres prestataires de services peut s'avérer intéressante financièrement pour le tunnel comme pour la collectivité. Il convient de prendre en compte les risques supplémentaires résultant de ces équipements.

Il est recommandé que les câbles principaux soient, dans la mesure du possible, posés à l'extérieur de l'espace circulé et protégés contre le feu et les effets d'un incendie.

Drainage

Le système de drainage devrait être conçu de manière à empêcher :

- les grandes flaques sur la chaussée,
- l'incendie d'une nappe de liquide inflammable en mouvement,
- la propagation d'un incendie le long du tunnel (par exemple, en ayant recours à des réseaux de canalisations entièrement protégés),
- la propagation d'un incendie d'un tube à l'autre.

Les systèmes de drainage à fentes sont très difficiles à entretenir, car ils sont vite remplis de poussière, papiers, etc.

Le fait d'avoir deux dispositifs de drainage séparés dans le tunnel présente des avantages pour l'environnement : l'un des systèmes recueille l'eau sale de la chaussée et les eaux de lavage, et l'autre recueille les eaux d'infiltration du sol. Ainsi, les rejets de chaque dispositif peuvent être traités convenablement et simplement.

La conception des conduits et les distances entre les points d'accès devraient permettre un nettoyage régulier, surtout dans les régions où l'eau est très calcaire (les dépôts de carbonate de calcium peuvent boucher les conduits).

Le bassin-versant des abords, qui concentre l'eau à la tête de tunnel, devrait être conçu en fonction des mêmes critères que le tunnel.

Les systèmes de drainage, puisards, fosses d'aspiration, puits secs et chambres de pompes devraient être soigneusement étudiés. Il est préférable d'avoir plusieurs pompes à alimentation électrique protégée, ainsi qu'un accès facile pour l'entretien, accès qui ne soit pas situé sur la chaussée du tunnel.

In the urban situation, there is normally a much higher demand for service routes. A conveniently located tunnel may be an economic and perhaps the only practical route for carrying other major urban infrastructure such as power, water and communications main services. Provision of additional duct space/capacity for equipment belonging to other service providers can be financially beneficial to the tunnel project and the community. Any additional risks arising from such equipment need to be taken into account.

Main cable duct should be placed outside the traffic space (as far as possible) and protected from fire exposure and fire effects.

Drainage

The drainage system design should be aimed at preventing:

- large puddles influencing the traffic;
- flowing pool fires;
- propagation of fire along the tunnel (e.g. by using fully trapped pipe networks);
- propagation of fire from one tunnel tube to the other one.

Slot drain systems are very difficult to maintain, because they are prone to be filled with dust, papers etc.

There are environmental advantages to having two separate drainage systems in the tunnel; one that collects contaminated water from the carriageway, wash downs and cleanings, and another one that collects water from ground filtrations. This way, the waste in each system can be treated appropriately and in the simplest manner.

The design of the ducts and the distances between access points should allow for regular cleaning, especially in areas with a lot of calcium in the water (calcium carbonate deposits may clog the ducts).

The catchment area of the approach roads which concentrates water to the tunnel portal should be designed using the same criteria as the tunnel itself.

Drainage systems, sumps, wetwells, drywells and pump chambers should be carefully designed. Multiple pumps with protected power supply are preferable, as well as easy maintenance access, preferably not from the tunnel roadway.



Protection de la structure du tunnel

La surveillance permanente des abords immédiats du tunnel est recommandée dans les zones où des travaux de construction dans le voisinage peuvent endommager la structure du tunnel.

Il est recommandé que les locaux techniques ayant un accès extérieur séparé soient dotés d'une protection de qualité contre les intrusions en plus d'une protection contre l'incendie.

Contraintes de génie civil concernant les équipements

Le bureau d'études ne doit pas oublier que, pour un tunnel urbain, il est très difficile d'apporter des modifications à l'ouvrage une fois qu'il a été mis en service. Étant donné que tous les équipements finiront par devoir être réparés ou changés, il est souhaitable que leur conception le permette facilement. Les locaux qui abritent des équipements devraient être facilement accessibles et suffisamment vastes pour permettre les travaux d'entretien.

Eclairage

La voirie urbaine est éclairée toute la nuit. Il est donc très important d'harmoniser l'éclairage du tunnel avec l'éclairage extérieur de nuit comme de jour.

Les catadioptrés permettent de délimiter les voies et de marquer le bord de la chaussée à l'intérieur du tunnel, mais entraînent un surcroît d'entretien. Un marquage actif (éclairé) des murs ou des bordures peut être mis en place si nécessaire pour réduire la fréquence des accidents.



Protection of the tunnel structure

Permanent observation of the immediate surroundings of the tunnel is recommended in areas where construction work in the neighbourhood may damage the tunnel structure.

Plant and equipment rooms with separate external access should have good quality security protection in addition to fire protection.

Civil engineering demands from equipment

The designers must bear in mind that, for an urban road tunnel, it will be very difficult to make changes to the tunnel structure once it is in use. Since all equipment will eventually have to be repaired or replaced, the design should make this possible easily. Housings for machinery and switchgear should be large enough to allow for maintenance work and have convenient access.

Lighting

The urban highway is lit throughout the hours of darkness and it is very important to harmonize tunnel lighting with these conditions as well as with daylight conditions.

Cat eyes help with lane delineation and carriageway edge marking inside a tunnel, but will require additional maintenance. Active (lit) wall or curb marking can be provided to reduce accident frequency, where appropriate.





Alimentation et transformation électrique

D'une manière générale, en zone urbaine on a un plus grand choix de solutions pour l'alimentation en énergie. On peut s'en servir pour accroître la redondance, de sorte que les diverses alimentations se secourent mutuellement.

Ventilation

La conception de la ventilation d'un tunnel urbain doit prendre en considération la qualité de l'air et les problèmes de pollution à proximité des têtes et des endroits où sont rejetés les gaz d'échappement. A cet effet, la capacité de ventilation devrait être suffisante, même longtemps après l'ouverture du tunnel à la circulation. Pour plus de détails, voir le rapport de l'AIPCR [5].

Si l'on envisage d'appliquer une ventilation longitudinale dans un tunnel routier urbain, il est recommandé de tenir compte de la congestion à l'intérieur du tunnel, surtout en cas d'incendie :

- maîtriser la congestion lorsque c'est possible, mais cela peut réduire la capacité d'écoulement du trafic ;
- envisager une extraction massive et localisée des fumées ou un conduit d'évacuation continu.

En cas de ventilation longitudinale, il est également important de disposer d'une certaine surcapacité de sorte que, même si certains ventilateurs sont mis hors service par un incendie et qu'un ou deux ventilateurs sont en révision, la capacité de désenfumage nécessaire soit quand même assurée.

Il est préférable de monter les accélérateurs sur des châssis suspendus et de les équiper de branchements mécaniques et électriques faciles à démonter et à remonter. En outre, les systèmes de ventilation devraient assurer une certaine surcapacité et redondance.

Pour des recommandations complémentaires concernant la ventilation, voir aussi le rapport de l'AIPCR [6].

Détection d'incendie

L'expérience montre que, dans la plupart des incendies, la première alerte vient du système de détection d'incident utilisant la vidéosurveillance (ou DAI). Un détecteur d'incendie à câble linéaire ne réagit pas aux petits incendies ou aux incendies qui se déplacent. Les systèmes de détection automatique d'incident permettent de détecter un véhicule arrêté et ils réagissent aussi à la fumée.

Energy supply and transformation

The urban situation usually provides a greater choice of energy supply options. This can be used to increase redundancy, so that alternative supplies can be used to back up each other.

Ventilation

The design of ventilation of an urban tunnel must take into consideration air quality and environmental pollution issues in the vicinity of portals and exhaust areas. Ventilation capacity should be adequate for this, even a long time after opening the tunnel. For more details see PIARC report [5].

When considering applying longitudinal ventilation in an urban road tunnel, congestion in the tunnel should be taken into account especially in case of fire as:

- to control congestion when possible. But these measures are reducing the traffic volume capacity;
- massive localised smoke exhaust, or continuous exhaust duct.

In case of longitudinal ventilation it is also important to have a certain amount of overcapacity so that even if some of the fans are incapacitated by a fire, and one or two are down for overhaul, the necessary capacity is still upheld.

Jet fans are preferably mounted in suspension sub cradles with quick release and refix mechanical and electrical connections. Also, ventilation systems should provide limited surplus capacity and redundancy.

For more recommendations on ventilation, see also PIARC reports [6].

Fire detection

Experience shows that in most fires, the first alarm comes from incident detection system based on CCTV⁷ (or AID). A linear cable fire detector does not respond to small fires or moving fires. Automatic incident detection systems can detect any stopping vehicle, and can react also to the smoke.

⁷ CCTV: Closed Circuit Television



Système de gestion du trafic

Avant de concevoir le système de gestion du trafic, il est conseillé de :

- étudier le réseau routier, le trafic sur ce réseau et les environs immédiats du tunnel ;
- analyser les processus que l'opérateur tunnel doit gérer, y compris les voies d'accès, s'il y a lieu, et les tâches qu'il doit exécuter à l'aide des équipements ;
- choisir les actions qui doivent être exécutées manuellement et celles qui peuvent être exécutées automatiquement suite à une détection.

Dans un tunnel urbain, la gestion efficace du trafic revêt une importance capitale pour assurer un parcours rapide et sans danger dans le tunnel. Les équipements destinés à une gestion efficace du trafic d'un tunnel routier urbain devraient permettre :

- un flux de circulation régulier et constant dans le tunnel et sur les accès ;
- la limitation de la congestion à l'intérieur du tunnel (surtout en cas de ventilation longitudinale) ;
- la détection rapide des incidents ;
- la gestion rapide des incidents et accidents, en tenant compte des besoins et de la sécurité des personnes impliquées dans l'incident, des autres personnes qui se trouvent dans le tunnel, des automobilistes qui s'approchent du tunnel, des véhicules de secours intervenant sur l'incident et des véhicules de secours qui doivent emprunter le tunnel pour se rendre sur un autre lieu d'intervention ;
- au personnel du poste de contrôle commande de disposer d'un matériel de contrôle robuste et fiable lui permettant de mettre en application une gestion proactive du trafic, et de réagir rapidement et efficacement à tout événement.

Il faut noter que, dans la plupart des cas où la gestion du tunnel est incluse dans la gestion d'un réseau routier, la continuité du trafic a tendance à être prioritaire sur la sécurité des personnes. Or un tunnel nécessite une approche différente. En effet, même si des mesures préventives ont été prises et que la probabilité d'un accident (incendie) est plus faible qu'à l'air libre, l'évolution (intensification) d'un accident majeur peut être plus rapide et ses conséquences peuvent être plus graves en raison des conditions particulières. C'est pourquoi, dans la gestion d'un tunnel, la sécurité devrait être prioritaire sur la continuité du trafic. Autrement dit, la présomption d'un accident majeur devrait entraîner la fermeture d'un tube du tunnel, même si cela doit provoquer un bouchon. C'est ce qui explique que la formation d'un opérateur à la gestion du trafic devrait plus insister sur la sécurité dans le tunnel que sur l'écoulement de la circulation.

Système de transmission de données

D'une manière générale, la complexité d'un tunnel urbain et de ses équipements nécessite un système de transmission de données complexe et robuste. Le

Traffic management system

Before designing the traffic management system, the following steps should be taken:

- analyse the road network, its traffic, and the immediate surroundings of the tunnel;
- analyse the processes that the operator has to manage, including approach road network if appropriate, and the tasks that he has to perform, using the equipment;
- make a choice which actions have to be taken manually and which actions can be executed automatically based on detection

In an urban road tunnel, effective traffic management is of the utmost importance to ensure safe and rapid passage of the tunnel. Effective traffic management equipment for an urban road tunnel should be aimed at:

- a smooth and steady flow of traffic through the tunnel and connecting network;
- limiting congestion inside the tunnel itself (especially when applying longitudinal ventilation);
- rapid incident detection;
- rapid traffic management of incidents and accidents, taking into account the need and safety of people involved in the incident, other people in the tunnel, drivers approaching the tunnel, rescue vehicles responding to the incident and rescue vehicles having to drive through the tunnel on their way to an emergency elsewhere;
- sound and reliable control equipment for the control room personnel, enabling them to implement pro-active traffic management and to respond quickly and effectively to any occurring event.

It should be noted that in most cases where tunnel traffic management is a part of network traffic management, traffic movement tends to receive a higher priority than ensuring safety for all concerned. However, a tunnel requires a different approach. Even if preventive measures have been taken and the probability of an accident (fire) is lower than in the open, the development (escalation) of a major accident may be more rapid and the consequences more severe because of the specific circumstances. Therefore, in a tunnel, safety should take precedence over traffic movement in traffic management. This means closing a tunnel tube if a major accident is suspected, even if this causes congestion. Therefore, if a tunnel is to be managed by an operative, traffic management training should give greater emphasis to tunnel safety than to general traffic movement.

Data transmission system

The complexity of an urban road tunnel and its equipment usually requires a complex and robust data transmission system. The network must offer possibilities



réseau doit offrir des accès simples et fiables. Il doit permettre le partage des ressources informatiques entre les différentes applications, afin que chaque application puisse fonctionner avec une qualité de service optimale. Cette dernière est définie par le débit minimum, le taux de perte ou d'erreur, le retard à la transmission et la variation du retard à la transmission.

La continuité du service doit être garantie par une conception robuste. On peut ainsi prévoir un certain degré de redondance pour compenser une défaillance simple d'un élément du réseau de transmission ou pour continuer à fonctionner pendant les périodes d'entretien et de modification du réseau.

Pour pouvoir vérifier et valider des modifications avant de les appliquer, il est recommandé de prévoir un environnement d'essai pour le logiciel, identique à l'infrastructure TIC⁵ du tunnel. Cela pourra également servir à analyser l'effet des modifications lors de tests avec une simulation de trafic.

Poste de contrôle commande

La nécessité d'un poste contrôle commande (PC) est beaucoup plus grande pour un tunnel urbain qu'en n'importe quel autre point du réseau routier. Si le PC d'un tunnel urbain est intégré dans un centre de régulation du trafic d'une zone géographique étendue, il est absolument crucial que les principales fonctions de sécurité et de contrôle de chaque tunnel soient prioritaires. Plus le nombre de tunnels augmente dans une zone, plus cet aspect est important. En particulier, si le PC du tunnel est intégré dans un poste central de régulation qui exploite un réseau étendu, il est impératif de définir soigneusement les procédures propres au tunnel, afin de gérer les événements qui peuvent s'y produire.

En outre, si l'exploitant du tunnel doit faire appel à des services d'urgence (police de la route, pompiers, service de secours, etc.) pour effectuer la première intervention en cas d'accident, le déroulement de leur intervention doit, dans toute la mesure du possible, être organisé à l'avance. Il convient de contractualiser ces aspects, en fonction des activités propres à chacun des intervenants.

Panneaux de signalisation

Les réglementations nationales relatives aux panneaux de signalisation ne sont pas toujours adaptées aux contraintes des tunnels urbains sur le plan des dimensions, des distances et de la visibilité. Pour plus de recommandations sur les panneaux de signalisation, voir le rapport de l'AIPCR [7].

⁵ Technologies de l'Information et de la Communication

of simple and reliable access. It must permit the sharing of the capacity between the applications so that every application can benefit from resources placed at their disposal with an optimal service quality. This is defined by: the minimum debit, the rate of loss or mistake, the transmission delay and the variation of the transmission delay.

The continuity of the service must be guaranteed by a robust design, e.g. building in redundancy to compensate for simple malfunction of an element participating in the transmission or during the periods of maintenance and modification of the network.

A testing environment for the software, identical to the ICT⁹ infrastructure of the tunnel itself, is recommended to be able to verify and validate modifications before implementing them. Such a testing environment can also be used for analysing the effect of any changes by testing it using a traffic simulation.

Control Centre

There is a much greater need for a control centre for an urban road tunnel than anywhere else on the road network. If the urban road tunnel control centre is combined into a wide area traffic control centre it is vitally important that the key safety and control functions for each tunnel retain their priority. This becomes more important with an increasing number of tunnels in a given area. In particular, if the tunnel Control Centre is integrated in a Control Centre operating a wide network, a careful definition of operative procedures is required, specific for the tunnel, in order to manage the events which can occur in this structure.

Moreover, where the tunnel manager has to ask for emergency Services (i.e. Road Police, Fire Brigade, Rescue organization etc.) to perform the first intervention in emergencies, the course of their intervention must be planned in advance, as much as possible. An agreement must be signed to plan these aspects, according to the activities performed by each team.

Traffic signs

National regulations about traffic signs are not always well suited to the urban tunnel situation in size, distances and visibility. See PIARC Report [7] for more recommendations about traffic signs.

⁹ Information and Communication Technology



► 3.3 REMISE EN ÉTAT OU MODERNISATION IMPORTANTE

3.3.1 Les défis

Si les équipements du tunnel ne répondent plus aux besoins de l'exploitant ou des usagers, si les exigences de la réglementation ou les caractéristiques du trafic ont changé, il peut être nécessaire de rénover le tunnel et ses équipements.

Une nouvelle réglementation ou une évolution technique des équipements (en termes de fonctionnalité, de sécurité, de meilleur rendement énergétique ou de besoin moindre en entretien préventif) peuvent conduire à envisager des travaux préprogrammés. A cela s'ajoute la nécessité de changer du matériel usagé. En général, les travaux de grande ampleur sont traités sous forme de projets spéciaux.

Exemples de travaux :

- amélioration de la ventilation pour faire face à de nouvelles exigences pour le tunnel ou ses abords ;
- installation de matériel de technologie plus récente, avec de meilleures performances et/ou un coût de entretien moindre (le coût global peut cependant augmenter si on ajoute de nouveaux équipements) ; ainsi, des systèmes de supervision neufs et plus performants peuvent être utiles à l'exploitant du tunnel ;
- coordination de l'exploitation, de la diffusion d'information et de la régulation du trafic du tunnel avec le réseau routier adjacent ;
- réparations ou modifications des caractéristiques de l'ouvrage ;
- amélioration des chemins d'évacuation ou des itinéraires de déviation (modifications géométriques et/ou signalétique).

3.3.2 Recommandations concernant la remise en état

En raison de la quantité importante de dispositifs présents dans un tunnel urbain, il est extrêmement important de tenir à jour toute la documentation concernant les équipements, non seulement après chaque remise en état importante, mais lors de chaque modification.

Habituellement, la remise en état nécessite la mise à jour des documents suivants :

- données techniques du tunnel et des équipements,
- procédures d'exploitation normale,
- procédures d'intervention d'urgence,
- procédures d'inspection et fréquence des inspections,

► 3.3 MAJOR REFURBISHMENT OR MODERNIZATION

3.3.1 Challenges

If the tunnel equipment no longer fulfils the needs of the operator or the tunnel users or the requirements of legislation, or the characteristic of the traffic has changed, it may be necessary to upgrade the tunnel.

The need for pre-planned work can be the consequence of, for instance, new regulations or opportunities to improve equipment, its functionality, safety or energy-efficiency, or to reduce preventive maintenance requirements. A further need is the occasional need to replace equipment due to age deterioration. Major work will usually be treated as special projects.

Activities may include:

- improving the ventilation to cope with new demands either outside the tunnel or in the tunnel;
- installing new equipment with new technology, better performance and / or lower maintenance cost (the cost may still rise because additional systems are installed), for instance new and more innovative SCADA systems may be helpful to the operator;
- coordination of the tunnel with the adjoining road network regarding traffic operation, information and control;
- structural repairs or modifications;
- improving the escape routes or emergency routes (structural modifications and / or signing).

3.3.2 Recommendations for refurbishment

Due to the amount of technical equipment in an urban road tunnel it is of utmost importance to keep all documentation about the equipment up to date, not only after major refurbishments, but whenever a change is made.

A refurbishment usually requires updating documentation of:

- technical details of the tunnel and equipment;
- procedures for normal operation;
- procedures and scenarios for emergency response;
- procedures for inspection and inspection frequencies;



- procédures d'entretien et fréquence de l'entretien,
- procédures concernant la formation initiale, la formation continue et les exercices.

Pour une remise en état importante, il est recommandé d'appliquer la même démarche que pour une conception initiale.

On trouvera des recommandations générales concernant la remise en état dans le rapport de l'AIPCR précité [1].

Système de supervision et d'acquisition de données (SCADA⁶)

En général, une remise en état importante impose de mettre en place un nouveau système de supervision. L'amélioration d'un système de supervision existant ou la mise en oeuvre d'un nouveau système doivent être prévues de manière à garantir en permanence la sécurité dans le tunnel et à pouvoir tout contrôler convenablement à chaque instant. Chacune des étapes de la remise en état doit être étudiée avec soin. Il faut également procéder à une analyse des risques pour la phase de basculement de l'ancien système vers le nouveau.

À titre d'exemple, la remise à niveau peut porter sur les éléments suivants :

- modification du logiciel de contrôle commande lors de la rénovation d'un équipement donné ;
- reconfiguration du logiciel de supervision lors de la mise en place d'un nouvel équipement ;
- automatisation de certaines tâches pour la gestion des accidents ou des incidents techniques :
 - alarmes au poste de contrôle commande,
 - fermeture d'une voie, d'un tube ou du tunnel tout entier,
 - commande d'urgence (éclairage, ventilation, voies d'évacuation, etc.) ;
- intégration dans un système de gestion du trafic plus vaste ;
- intégration dans un système d'informations routières destiné à informer le public sur les bouchons et les incidents.

Il est recommandé que, lorsque un ordre est passé, le système de supervision non seulement confirme l'ordre mais affiche aussi l'état du système (par exemple : traitement en cours – basculement effectué – démarrage – fonctionnement correct).

⁶ Signifie généralement « Système de Supervision et d'acquisition de données ». Toutefois, les fonctionnalités offertes par un système SCADA peuvent varier d'un pays à l'autre.

- procedures for maintenance and maintenance frequencies;
- procedures for education, training and exercise.

When planning a major refurbishment it is recommended to use the same approach as to a new design.

General recommendations on refurbishment can be found in the abovementioned PIARC Report [1].

SCADA¹⁰ system

Major refurbishment usually also requires reconstruction of the SCADA system. Any reconstruction of (parts of) a SCADA system must be planned to maintain safety in the tunnel and to ensure proper control of all elements at every moment. Each stage of the refurbishment has to be analysed in detail. A risk analysis has to be done regarding the migration process and the transitional periods.

Reconstruction could, for example, include:

- removal of the parts of the SCADA system for controlling and monitoring the equipment that is taken out of the tunnel during the refurbishment, and modify response for this parts;
- reconfiguring the system for new equipment and modify the response for this equipment;
- introducing automatic response by SCADA system in case of an incident, accident or system defect:
 - warning of the control centre operative,
 - closure of a lane, tunnel tube or the entire tunnel,
 - switching equipment into emergency mode (lighting, ventilation, escape ways etc.);
- integration in wider traffic system;
- integration in a traffic information exchange network for informing the public on congestion and incidents.

It is recommended that the SCADA system, when a command is entered, not only confirms the operative's command, but also displays the status of the system (e.g. processing command – switching on – starting up – functioning correctly).

¹⁰ Usually used as Supervisory Control And Data Acquisition. However the scope covered by SCADA can be different from one country to another.



Par ailleurs, il est bon de prévoir la possibilité d'un double contrôle pendant la période de transition (l'ancien et le nouveau système de supervision en parallèle) ainsi que des positions de repli permettant de traiter les problèmes survenant lors des essais ou de la mise en service.

Pendant la période de transition, toute détérioration ou réduction des performances du système de supervision doit être communiquée de manière très claire au personnel d'exploitation et d'entretien et être parfaitement comprise.

Autres points importants concernant les modifications apportées au système de supervision :

- formation du personnel d'exploitation et d'entretien à l'utilisation du nouveau système et de ses nouvelles fonctionnalités ;
- mise à jour de la documentation et des procédures concernant l'exploitation, l'entretien, les situations d'urgence et les tâches de l'opérateur.

Pour faciliter la mise en oeuvre d'un nouveau système, il peut être très utile que le système de supervision puisse fonctionner en mode simulation pour permettre la formation du personnel ainsi que la vérification et l'amélioration des procédures.

En plus de ce qui précède, il est important que les informations fournies par le système de supervision soient communiquées de manière claire aux agents du poste de contrôle commande à l'aide d'un interface adapté. Elles doivent donc être parfaitement visibles en cas d'alerte, afin d'être validées et vérifiées par l'opérateur. De même, l'équipe d'entretien doit disposer de données sur l'état du système de supervision afin de traiter les pannes, et défaillances, et les réparer très rapidement.

It is also convenient to plan the possibility of a dual control during a transitional period (both old and new SCADA in parallel), and fall-back arrangements to compensate for problems arising in test or initial functioning phases.

Information to the operation and maintenance personnel of any degradation or reduction in performance of the system throughout the period of change must be clearly communicated and understood.

Other important issues in connection with any changes to the SCADA system are:

- education and training of operation and maintenance personnel in the use of the new equipment and new routines;
- adaptation of procedures for operation, maintenance, emergency situations, operator activities, etc. in documentation for operation of tunnels;

To facilitate this, it can be very useful if the SCADA system can function in simulation mode for education and training purposes as well as checking and improving procedures.

In addition to the above, it is important that the SCADA system output, generally, is communicated in a clear way to Traffic Control Centre operators, using their common software interface. Consequently, in case of alarms, they must be visible very clearly in order to be validated and verified by the operator. As well, SCADA data must be available to the equipment maintenance team to take care and repair faults and malfunctioning, promptly.