

# TUNNELS URBAINS À GABARIT RÉDUIT CONCEPTION GEOMETRIQUE

Par Michel MAREC (France)  
Secrétaire francophone du Comité AIPCR  
des Tunnels routiers (C5)  
et Michel DEFFAYET (France)

# REDUCED HEIGHT URBAN TUNNELS GEOMETRIC DESIGN

By Michel MAREC (France),  
French-speaking Secretary of the PIARC  
Committee on Road Tunnels (C5)  
and Michel DEFFAYET (France)

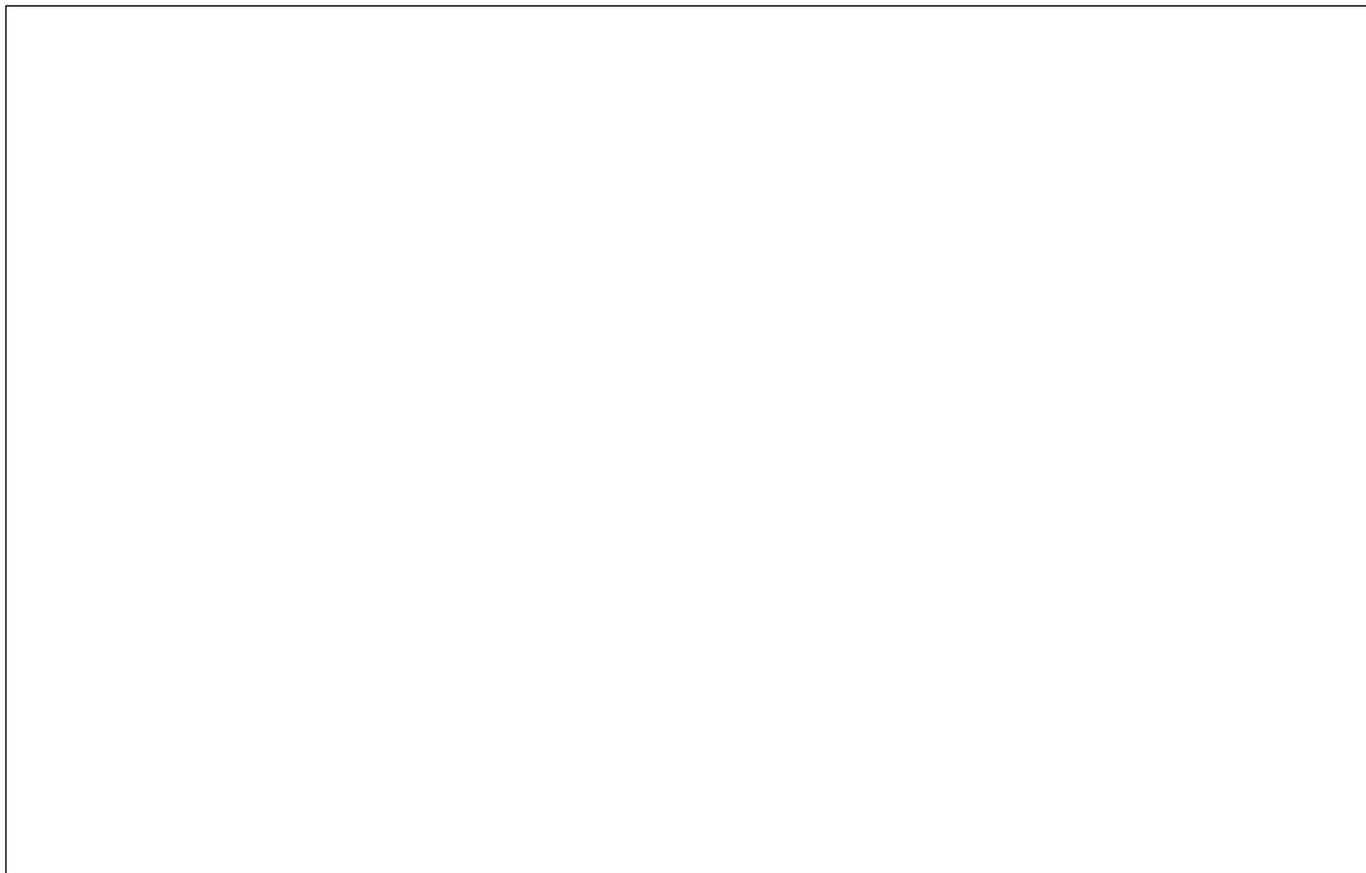


PHOTO COFIRROUTE

Projet française de tunnel à gabarit réduit

French project of reduced height tunnel

**e**n France, et depuis quelques années, l'idée de réaliser des tunnels longs à gabarit réduit est apparue pour répondre au souci d'offrir une alternative économique viable aux difficultés de circulation dans les grandes agglomérations urbaines.

**S**ome years ago in France the idea of building long, reduced size tunnels was born to meet the requirements of a viable economical alternative to traffic congestion in major urban agglomerations.

A Paris notamment, plusieurs projets proposés par des groupements d'entreprises ont été jugés véritablement dignes d'intérêt (bouclage de l'autoroute A86 circulaire autour de Paris, R.S.P. Réseau Souterrain Périphérique, réseau souterrain MUSE dans le département des Hauts de Seine...) et les pouvoirs publics ont engagé une large réflexion afin d'établir des outils ou des recommandations de conception qui prolongent les textes existants, inadaptés pour véritablement prendre en compte les spécificités de tels ouvrages.

Le présent article se propose de présenter ce qui caractérise de tels ouvrages.

## I - INTÉRÊT ET SPÉCIFICITE

Les tunnels urbains à gabarit réduit dont il est question ici sont des ouvrages d'une longueur allant de 500 m à une dizaine de kilomètres, situés dans des zones urbanisées.

L'intérêt de tels ouvrages repose sur un certain nombre

### I.1. Une très forte proportion du trafic urbain est composée de véhicules de hauteur limitée

La réglementation française des ouvrages souterrains est actuellement conçue pour l'ensemble du trafic. La hauteur libre minimale recommandée des tunnels est de 4,30 m, avec une possibilité de descendre à 3,50 m dans certains cas.

Une enquête sur la composition du parc automobile immatriculé en France en 1990, complétée par des mesures de hauteur réalisées sur les boulevards périphériques de Paris et Lyon permet de mieux comprendre la composition du trafic (voir figure 1).

### I.2. On constate qu'un tunnel à gabarit réduit aura une section plus faible, donc techniquement plus aisément réalisable

Les zones urbaines sont très souvent situées sur des terrains récents, de type alluvionnaire ; un des principaux problèmes auxquels a à faire face le concepteur est le risque de tassement dans les constructions existantes. Toute réduction de la section d'excavation, ainsi que toute possibilité de recourir à des méthodes de creusement avec confinement du front de taille, sont à privilégier et rendent le projet plus intéressant sur le plan économique.

In Paris in particular several projects put forward by business groups were considered of real interest. Examples are the completion of the A86 Paris motorway ring road, the Greater Paris Underground Network (R.S.P.), and the MUSE underground network in the Hauts de Seine department just west of Paris. The Public Authorities gave considerable thought to these projects so as to implement suitable methods or design recommendations that modified existing legislation, unsuited to the specific nature of such undertakings.

The present article is a roundup of ideas typical to such structures.

## I - INTEREST AND SPECIFIC POINTS

The reduced height urban tunnels under discussion here are in urban zones, and are from 500 metres to about ten kilometres long.

Structures of this sort take into account a number of factors.

### I.1. A very high proportion of urban traffic consists of limited height vehicles

Present French legislation concerning underground structures is designed to apply to all types of traffic. Minimum recommended headroom for tunnels is 4.3 m, going down to 3.5 m in certain cases.

Actual traffic composition is better understood now thanks to surveys carried out in France in 1990, and completed by height studies undertaken on the Paris and Lyons ring roads (see Figure 1).

### I.2. Reduced height tunnels have a smaller cross section and are thus technically easier to build

Urban zones are very often situated on relatively new, alluvial land; one of the major problems facing designers is the settling risk present in existing constructions. Any reduction in the size of excavation work, or any methods of using quarry face digging techniques are to be encouraged, thereby reducing project costs.

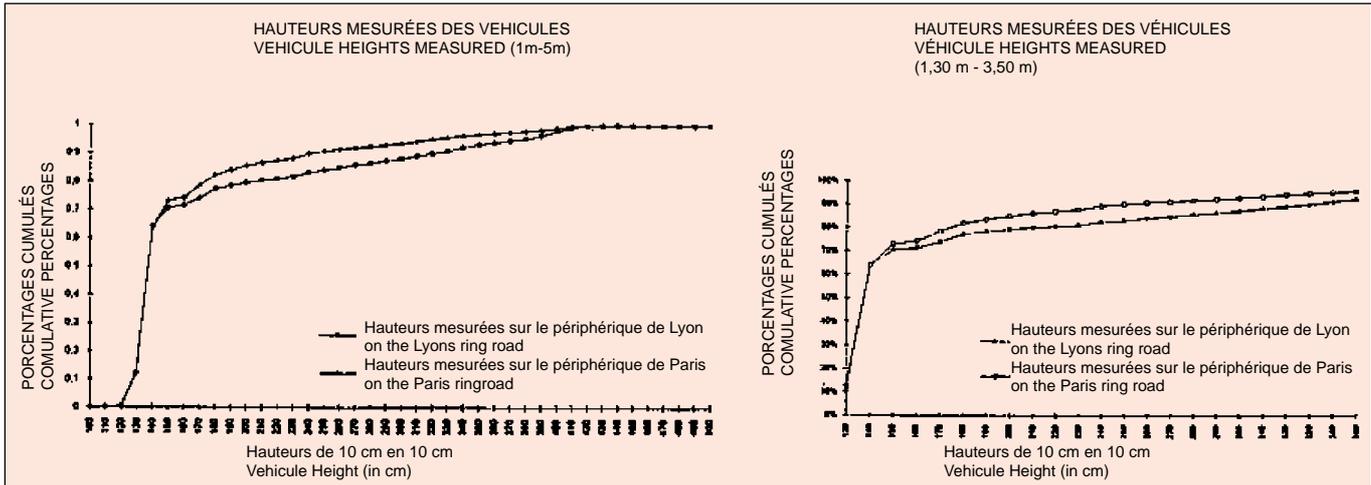


Figure 1

### I.3. Les déclivités admissibles peuvent être plus élevées que pour les tunnels devant admettre des poids lourds

En effet, les véhicules légers tolèrent des rampes de 6 % et même davantage sur de courtes sections. Les trémies d'accès en surface sont, de ce fait, nettement plus réduites.

### I.3. Acceptable gradients can be steeper than in tunnels accepting heavy vehicles

Light vehicles in fact can deal with slopes of 6%, or even more over short stretches. This therefore leads to considerably reduced approach sections.

### I.4. Du fait de l'homogénéité des véhicules, un tunnel à gabarit réduit présente, toutes choses égales par ailleurs, de bonnes conditions d'écoulement du trafic

En limitant le gabarit en hauteur, les véhicules autorisés à circuler dans le tunnel ont une silhouette, des performances, une puissance plus homogènes. Cet aspect n'est pas négligeable en matière de sécurité.

### I.4. Given the similarity in vehicle types, reduced height tunnels can - other things being equal - give good traffic flow conditions

By limiting tunnel heights, those vehicles allowed to use tunnels will be of similar shape, performance and speed. This is an important safety feature.

### I.5. Le tunnel fait partie d'un ensemble routier où les systèmes d'exploitation jouent un rôle prépondérant

Dans les zones urbaines, le trafic est souvent élevé et devient très important durant les heures de pointe. Des systèmes de gestion du trafic sont progressivement mis en place pour gérer la circulation, éviter qu'un incident n'entraîne une gêne trop considérable. La conception du tunnel se doit de prendre en compte les conditions d'exploitation de l'ouvrage, mais également au-delà, de l'ensemble du réseau sur lequel il est implanté. En complément, l'interdiction d'accès à un tunnel d'une partie du trafic suppose un dispositif d'information, de tri, de recyclage des véhicules hors gabarit. Les questions sont difficiles à régler et cependant fondamentales dès le stade de la conception.

### I.5. Tunnels are part of an overall road network where operating systems play a major role

In urban areas, traffic is often dense and increases considerably in rush hours. Traffic management systems are gradually being set up not only to direct traffic flow but also to minimize problems caused to users by incidents. Tunnel design must take into account the structure's operating conditions but also those of the network in which it is situated. Moreover the banning of certain vehicles supposes a method for identifying, sorting and rerouting oversized vehicles. These difficult but fundamental questions must be dealt with from the drawing-board stage.

Enfin, une étude spécifique est à mener dans chaque cas pour s'assurer que les moyens de secours (véhicules d'intervention usuels) peuvent pénétrer dans l'ouvrage. Lorsque le gabarit réduit devient inférieur à 3,30 m, un certain nombre de véhicules (camion-pompier par exemple) n'ont plus accès à l'ouvrage et les scénarios d'intervention doivent nécessairement envisager des solutions appropriées.

## 1.6. Il existe des précédents

Le recours à des ouvrages à gabarit réduit a déjà été utilisé pour réaliser, à faible coût, des carrefours dénivelés ou des petits tunnels urbains. Par exemple, à Nice, existent 6 tunnels de 2,50 à 2,70 m sous plafond et longs de 60 à 180 m. La spécificité des ouvrages dont il est question ici tient à leur longueur. Lorsque celle-ci dépasse 500 m, l'utilisateur doit s'adapter à son nouvel environnement et y trouver ses propres repères ; la largeur du profil en travers, la forme des paramètres, l'éclairage, la disposition du plafond, la signalisation deviennent des éléments fondamentaux.

## II - LES PRINCIPAUX CHOIX À EFFECTUER

Les éléments de base pour la conception géométrique du tunnel sont de trois ordres. Ils concernent la vitesse de référence de l'ouvrage, les conditions d'exploitation ainsi que le gabarit maximal autorisé. Les choix effectués sur ces paramètres seront déterminants pour l'ensemble du dimensionnement du tunnel et des échangeurs.

### II.1. Choix d'une vitesse de référence

Les voies rapides urbaines de surface sont conçues en France à partir de vitesses de référence de 60, 80 ou 100 km/h ; les vitesses plus importantes étant adoptées pour des voies à caractère de transit, avec peu d'échanges avec le tissu urbain. Dans le cas des tunnels urbains à gabarit réduit, deux typologies seulement ont été retenues, correspondant chacune à un comportement différent de l'utilisateur :

- la première est plutôt réservée aux ouvrages longs, ne comprenant qu'un nombre restreint d'échangeurs intermédiaires - La vitesse est alors de 80 km/h. Il y correspond normalement une vitesse autorisée de 70 km/h.
- la seconde assure une meilleure desserte du tissu urbain avec un nombre de points d'échanges importants.

Lastly a customized study must be carried out for each case to ensure that access is possible for the usual safety and maintenance services. When reduced height is less than 3.30 m, certain vehicles such as fire engines for example can no longer operate and other intervention procedures have to be envisaged.

## 1.6. Some precedents

Reduced height tunnels have already been built to produce low cost split-level junctions or small urban tunnels. In Nice for example there are 6 tunnels with ceiling heights of 2.50 m to 2.70 m and lengths from 60 to 180 m. The special feature of these tunnels is their length - beyond 500 metres users need to adapt to their new environment and correctly identify such essential basic elements as width and shapes, lighting, ceiling arrangements and signing.

## II - THE MAIN CHOICES TO BE MADE

There are three types of basic elements when considering the geometric design of tunnels. They are the speed limit required for the tunnel, the operating conditions and the maximum height allowed. Choices made based on these parameters are critical for overall tunnel and interchange design.

### II.1. Choice of a reference speed

Fast in-town above-ground roads are designed in France for speeds of 60, 80 or 100 km.p.h., the higher speeds being reserved for through roads having few interchanges or other contacts with urban structures. In the case of reduced height urban tunnels only two different types have been chosen, each corresponding to a different user behaviour:

- the first tends to concern primarily long structures with only a small number of intermediate interchanges. Speed here is 80 km.p.h. This generally corresponds to an authorized speed of 70 km.p.h.
- the second concerns better service of urban areas and a high number of interchanges.



PHOTO COFIROUTE

Securité, confort de conduite et circulation fluide ont été les objectifs constants des concepteurs  
 Safety, riding comfort and free-flowing traffic were the goals of designers

- Dans ce cas, la vitesse de référence est de 60 km/h. La vitesse autorisée est alors normalement de 50 km/h.
- The reference speed here is 60 km.p.h. Authorized speed is normally 50 km.p.h.

## II.2. Choix d'un mode d'exploitation

**L**a réflexion sur la stratégie et les moyens d'exploitation de l'ouvrage est une des composantes essentielles de la conception et ce, depuis les phases d'étude les plus en avant. Il ne serait pas raisonnable d'envisager un ouvrage urbain, appelé à recevoir un trafic important, sans prévoir une surveillance soignée de l'ouvrage et distinguer des scénarios élaborés et efficaces pour les cas d'incident.

Notons que les moyens et dispositions d'exploitation de l'ouvrage sont bien évidemment à définir en relation et en cohérence avec ceux du réseau sur lequel il est implanté.

Dans les tunnels à gabarit réduit, le choix d'un mode d'exploitation sera déterminant sur la fluidité, sur l'importance des répercussions possibles d'un incident du trafic et par conséquent sur les dispositions géométriques à envisager. Ainsi, l'exploitation et conception géométriques apparaissent étroitement liées, et cela tout autant que peuvent l'être vitesse de référence et géométrie.

On verra par la suite que les largeurs des profils en travers sont directement fonction du choix du niveau d'exploitation.

En allant du niveau le moins contraignant au plus élaboré, trois modes ont été retenus :

## II.2. Choice of an operating method

**C**areful thinking about strategy and operating means is one of the essential components of good design, starting from the very earliest phases of the project. It would not be reasonable to imagine an urban structure designed for dense traffic flow without planning some careful structure surveillance and drawing up elaborate, efficient accident and incident scenarios.

It should be noted that a structure's operating means and facilities must be clearly defined in relation to, and in harmony with, those of the network on which it is situated.

In reduced height tunnels, traffic flow and the possible consequences of traffic incidents, will depend on the choice of operating method, and consequently on geometric design decisions. Thus it can be seen that operation method and geometric design are closely linked, as much in fact as reference speed and geometry.

Later on we shall see that cross-section widths are directly linked to the choice of operating level.

Going from the least to the most restrictive level, three modes have been chosen:

- niveau TU3 : suivi continu de la circulation dans le tunnel par le biais de recueil de données. Ces données ne sont cependant pas obligatoirement traitées en temps réel. Les dispositions à prendre en matière de sécurité visent à assurer de bonnes conditions d'arrêt aux véhicules en difficultés, ainsi que pour l'usager en détresse la possibilité de se déplacer à pied dans l'ouvrage pour appeler du secours. Le temps d'intervention des secours pourra être de l'ordre d'une quinzaine de minutes.
- niveau TU2 : suivi permanent et contrôle des flux de véhicules entrant dans le tunnel avec neutralisation si nécessaire de certaines des voies de circulation. Pour cela, et limiter le risque de l'ampleur de congestion, l'exploitant doit disposer de moyens de surveillance performants et d'équipes d'intervention rapide (quelques minutes).
- niveau TU1 : la surveillance du trafic est très précise, et permet le suivi permanent et individuel de chacun des véhicules. Le flux est maîtrisable, que se soit dans le tunnel (neutralisation éventuelle des voies) ou aux accès (filtrage et temporisation). Il est prévu un suivi des vitesses individuelles pratiquées et une détection instantanée des incidents ou anomalies.

- TU3 There must be continuous surveillance and data-collecting of in-tunnel traffic. This data is not necessarily processed in real time. The safety arrangements to be carried out concern conditions for vehicles in difficulty to stop, and for their users to be able to walk in the tunnel to call for help. Intervention time for the rescue services may be about 15 minutes.
- TU2 There must be traffic flow control systems to limit tunnel entry and if necessary to close one or more traffic lanes. To do this and also to avoid congestion the tunnel operator must therefore have sophisticated surveillance systems and rescue teams able to intervene in a few minutes.
- TU1 Traffic surveillance is very precise, each individual vehicle being permanently observed. Traffic flow can be controlled, whether within the tunnel - with lanes closed if necessary - or at entries, where filtering and waiting are also controllable. Observation of actual individual speeds and instant detection of incidents and accidents is planned.

(TU = Trafic urbain, Urban Traffic).

Il est à remarquer que si les niveaux TU3 et TU2 peuvent être mis en place sans trop de difficulté, le niveau TU1 s'adresse à des projets résolument novateurs, pour lesquels des efforts de recherche, tant sur le plan du matériel que de l'organisation, sont encore à mener.

It should be noted that while levels TU3 and TU2 can be set up fairly easily, level TU1 involves some very novel projects that require further equipment and organization research efforts.

### I.3. Choix du gabarit autorisé en hauteur

**L**e choix du gabarit autorisé en hauteur se fait à partir de l'observation du parc automobile existant en prenant en compte bien évidemment les véhicules de secours et d'intervention.

L'idée est d'aboutir à un nombre restreint de gabarits standards afin d'obtenir une certaine homogénéité des caractéristiques géométriques entre les différents ouvrages et d'habituer l'usager à des limitations clairement identifiées.

Les trois gabarits standards retenus, adaptés pour le parc français de véhicules sont :

- a) Le gabarit autorisé de 2 m

Avec un tel gabarit, seuls les véhicules hauts de moins de 2 m sont autorisés à pénétrer dans le tunnel. Cela ne signifie, bien évidemment pas, que le plafond ou un quelconque obstacle, puisse être situé à une telle hauteur. Une marge est réservée pour permettre aux véhicules de rouler confortablement. Concrètement, aucun élément (plafond, bas d'un panneau de signalisation....) ne peut être positionné à moins de 2,15 m.

### II.3. Choosing suitable heights

**t**he choice of tunnel heights is based on observation of existing vehicle requirements. Clearly safety and maintenance vehicles are also taken into account.

The idea is to establish a limited number of standard sizes that share certain geometric characteristics, thereby familiarizing users with some clearly identifiable restrictions common to most structures.

The three standard sizes chosen in France are:-

- a) Authorized height 2 metres

In this case all vehicles less than two metres high are admitted into the tunnel. Naturally the ceiling and any obstacles are not at the same height, there being a margin allowing vehicles to move safely. In fact nothing (neither ceiling nor sign, etc.) may be fitted below 2.15 metres.

Dans un ouvrage de ce type, de 80 à 85 % des véhicules mesurés sur les boulevards de Paris ou Lyon seraient autorisés à pénétrer. Cela concerne toutes les voitures particulières, les fourgonnettes, les véhicules 4x4. Sont exclus les fourgons et les camions. Les véhicules admis ont une silhouette homogène, de largeur maximale voisine de 1,80 m (avec une moyenne proche de 1,65).

In a structure of this type, 80% to 85 % of the vehicles observed on the Paris and Lyons boulevards would be eligible. This concerns all private cars, vans and 4WD vehicles, but would exclude trucks and lorries. Permitted vehicles are similarly shaped with a maximum width of 1.80 metres, and an average width of about 1.65 metres.

Pour le gabarit de 2 m, le problème des véhicules de secours est fondamental ; les fourgons ou camions habituellement employés par les pompiers ou les infirmiers ne pouvant accéder à l'ouvrage, une réflexion approfondie et spécifique est à mener dans chaque cas. L'issue de cette réflexion conditionne la faisabilité de l'opération.

With a height of 2 metres the problem of safety vehicles is fundamental - vans and lorries generally used by the fire and ambulance services cannot enter the tunnel. Careful, specific examination of each case is required. Feasibility depends on the outcome of this examination.

## b) Le gabarit autorisé de 2,70 m

## b) Authorized height 2.70 metres

Les ouvrages autorisant l'accès à des véhicules haut de 2,70 m ne doivent pas présenter d'obstacle à une hauteur inférieure à 2,85 m.

Tunnels allowing vehicles 2.70 metres high to enter should not have any obstacles below 2.85 metres.

Ce gabarit offre l'avantage par rapport aux gabarits de 2 m, de laisser l'accès libre aux fourgons, aux caravanes, et aux véhicules de secours et d'intervention. Ne seront pas admis les camions, les autocars, les bus urbains et les camping-cars, ni les véhicules de lutte contre l'incendie avec échelle.

As compared with the 2-metre height, this size allows free access for vans, caravans and safety and maintenance vehicles. Lorries, coaches, town buses and camper cars are refused, and so are fire-fighting vehicles with ladders.

D'après les mesures faites sur les Périphériques de Paris et Lyon, de 86 % à 92 % des véhicules ont une hauteur inférieure à 2,70 m. La largeur maximale de ces véhicules atteint 2 m.

Measurements carried out on vehicles using the Paris and Lyons ring roads show that 86% to 92% of them are less than 2.70 metres high. Their maximum width is 2 metres.

Ce gabarit pose le problème du transport en commun, car il n'est compatible qu'avec des minibus surbaissés.

This is the tunnel size that raises the question of public transport because only very low minibuses are compatible.

## c) Le gabarit de 3,50 m

## c) Authorized height 3.50 metres

Ce gabarit est déjà mentionné dans les textes réglementaires existants. Il permet le passage des véhicules de secours, des bus urbains et des autocars à un niveau ; seuls les camions et les autocars à 2 niveaux ne sont pas admis.

This size is already present in existing legislation. It allows safety vehicles and single-decker buses and coaches through while refusing lorries and double-decker buses and coaches.

Le pourcentage de véhicules, mesurés à Lyon et Paris et de hauteur inférieure à 3,50 m, sont de 93 % à 96 % de l'ensemble des véhicules. Leur largeur peut atteindre 2,50 m.

Between 93 % and 96 % of all vehicles measured in Lyons and Paris are less than 3.50 metres high. They may be up to 2.50 metres wide.

Le choix de réaliser un ouvrage à gabarit réduit, puis de retenir un des 3 gabarits standards relève nécessairement d'une large concertation et d'une vision à long terme de l'organisation du réseau global de circulation ainsi que d'une bonne connaissance de la composition du parc à faire transiter.

Choosing to build a reduced height structure featuring one of the three standard sizes automatically involves considerable joint operations and a long term view of the overall organization of traffic networks, as well as sound knowledge of the vehicle population in question.

### III - LES PRINCIPALES ORIENTATIONS DANS LA CONCEPTION GEOMETRIQUE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage souterrain à gabarit réduit peut être intégré dans un réseau de voiries souterraines et donc être composé d'une succession de configurations différentes : par exemple, un tunnel principal, une zone de raccordement ou d'échanges, un rameau de liaisons entre tubes ou avec la surface.... chacun de ces éléments présentant ses propres spécificités au stade de la conception, de la réalisation et de l'exploitation.

Seul le cas d'un tunnel unidirectionnel, destiné à recevoir un trafic moyen à fort, et d'une longueur supérieure à 500 m est traité ici. Il ne s'agit pas non plus de reprendre tous les éléments de conception traditionnels des voies rapides urbaines, mais de mettre en relief les spécificités majeures qui sont liées à la typologie de voie, au gabarit réduit et au niveau d'exploitation.

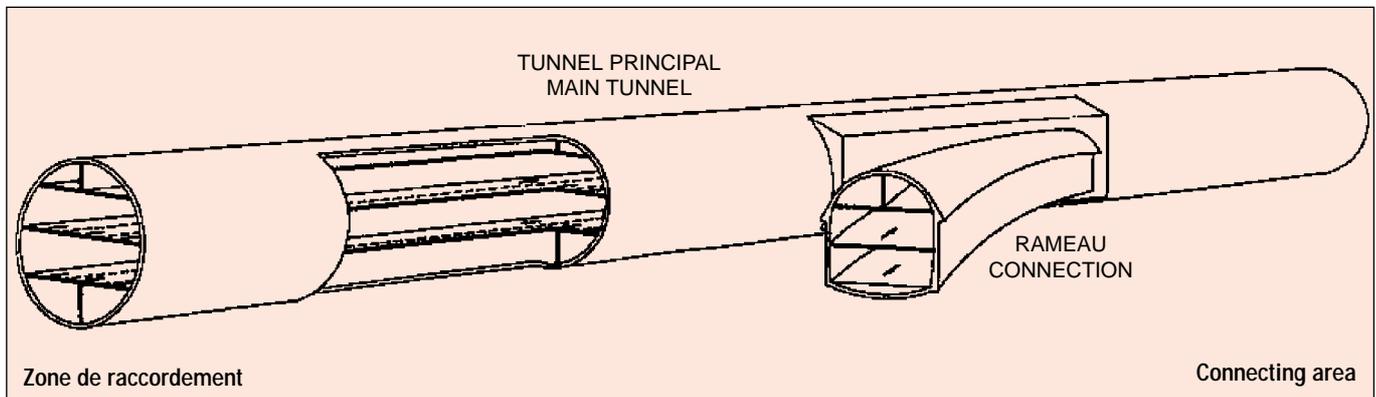


Figure 2

### III - THE MAIN POINTS OF GEOMETRIC DESIGN OF STRUCTURES

Reduced height underground structures can be built into an underground street network and can thus consist of a succession of different configurations. There could for example be a main tunnel, then a connecting or interchange area, followed by connections between tubes or with the surface. Each of these features would require specific design, construction and operation.

Only the case of a one-way tunnel, longer than 500 metres and designed for medium-to-dense traffic will be dealt with here. The aim is not to deal with all the traditional design elements but to highlight major specific points concerning reduced height tunnels and their operation.

#### III.1. Tracé en plan et profil en long

Les rayons minimum en plan ou en profil en long sont tout à fait conformes à ce qu'exigent les textes réglementaires pour l'air libre, à des vitesses de référence de 60 à 80 km/h. La déclivité maximale dans le cas d'un tunnel à 2 ou 3 voies de circulations (par sens) est fixée à 6 % avec une possibilité de 9 % sur une longueur très courte. Dans les trémies d'accès, la pente admissible va jusqu'à 12 %.

Il est admis qu'à partir d'une certaine distance des entrées, et sous réserve d'un entretien soigné et régulier de la chaussée (sur la base d'un cahier des charges et un engagement de l'exploitant), le coefficient de frottement en freinage peut être majoré de 30 %. La décélération de freinage passe alors de 0,46 g à 0,6 g

#### III.1. Horizontal and lateral alignment

Minimum horizontal and lateral alignment radii conform exactly with "open-air" regulations for reference speeds of 60 to 80 km.p.h. Maximum gradient angle for a tunnel with 2 or 3 lanes in each direction is fixed at 6%, but 9% is possible over very short stretches. The allowable slope may be as much as 12 % in approach areas.

It is known that at a certain distance from entries braking force coefficients may be increased by 30% - provided that road surface maintenance is carefully and regularly carried out based on specific contractual conditions respected by the operator. Deceleration thus changes from 0.46g to

pour une vitesse de référence de 60 km/h et de 0,42 g à 0,55 g pour une vitesse de 80 km/h. La principale conséquence en est une réduction de la distance d'arrêt (réduction de 7 m pour 60 km/h et 14 m pour 80 km/h) et donc des exigences en matière de visibilité latérale en courbe ou en angle saillant pour permettre l'arrêt derrière un véhicule arrêté.

0.6g for a reference speed of 60 km.p.h. and from 0.42g to 0.55g for a speed of 80 km.p.h. The main consequence is a reduced stopping distance (reduction of 7 m at 60 km.p.h. and 14 m at 80 km.p.h.) and therefore good visibility is required in curves and bends so that moving vehicles can stop behind stationary ones.

Cette évolution est plus importante qu'il n'y paraît de prime abord, car elle limite les dégagements latéraux imposés et donc la surface à excaver. A titre d'exemple, dans le cas d'un rayon en plan de 240 m avec une vitesse de référence de 80 km/h, le dégagement latéral peut être diminué de 1,40 m.

This development is more important than it first appears because it limits horizontal diggings, thus reducing the overall excavated surface. As an example, in the case of a horizontal radius of 240 m and a reference speed of 80 km.p.h., lateral digging can be reduced by 1.40 m.

## III.2. Profil en travers

C'est, bien sûr, dans l'étude du profil en travers que les conséquences de la réduction du gabarit sont les plus importantes ; pas seulement en ce qui touche la hauteur de l'espace de circulation, mais également la largeur du profil en travers, les véhicules les plus bas étant aussi les plus étroits.

### a) Détermination de la hauteur du profil en travers

D'une façon tout à fait analogue à ce qui est fait pour les tunnels à gabarit normal, chaque véhicule doit pouvoir circuler sans risque, en tout point du profil en travers qui lui est accessible.

Ainsi, sur l'ensemble de la largeur roulable (définie entre bute-roues latéraux par exemple), augmentée d'une revanche latérale additionnelle de 5 à 10 cm, une hauteur libre suffisante doit être mise en place. Cette hauteur libre est égale à la somme du gabarit autorisé (hauteur maximale statique des véhicules autorisés à entrer), d'une revanche pour permettre les mouvements dynamiques et donner confiance à l'utilisateur et d'une revanche de protection vis-à-vis des équipements fixes ou panneaux qui se trouveront au-dessus. L'ensemble de ces revanches est fixé à 15 cm pour les gabarits de 2 m et 2,70 m et 20 cm pour celui de 3,50 m.

## III.2. Cross section

naturally it is when we study the cross section that the consequences of reduced sizes become more apparent; available height is concerned but so too is cross section width, the lowest vehicles also being the narrowest.

### a) Determining cross section height

The cross section must be fully accessible and safe for the movement of vehicles in the same way as for normal-sized tunnels.

Thus for a given overall usable width - defined for example as being the distance between sidewall hubcap heights, plus a lateral clearance of 5 to 10 cm - a suitable height must be available. This headroom is equal to the total authorized height (maximum static height of authorized vehicles) plus a clearance to allow dynamic movement and to give confidence to users and a protection clearance from fixtures or overhead signals. The overall value of these clearances is fixed at 15 cm for vehicle heights of 2 metres and 2.70 metres, and 20 cm for the 3.50 m height.

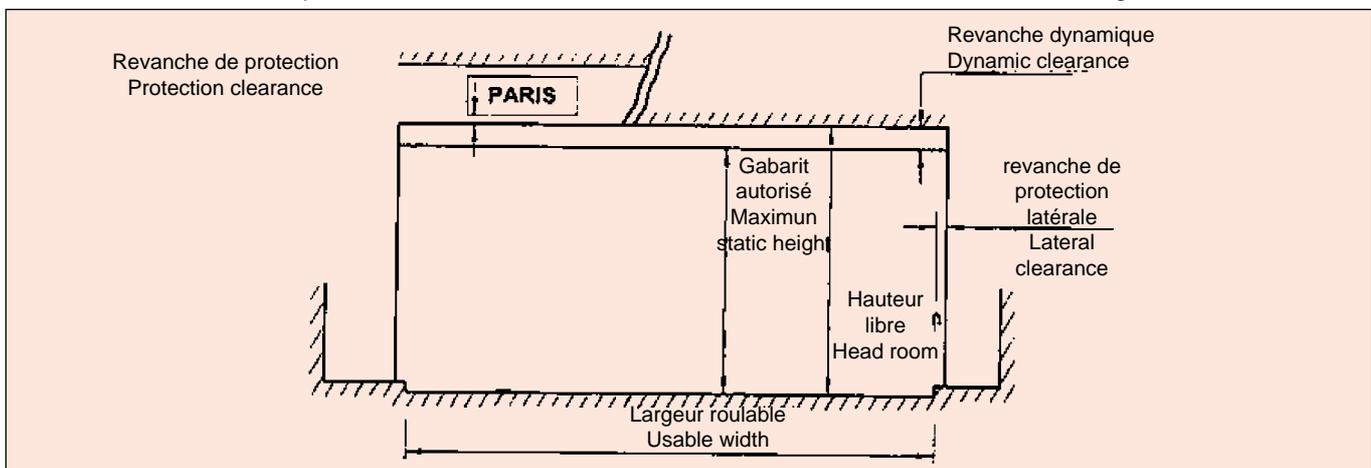


Figure 3

La figure 3 reprend l'ensemble de ces données. Il est à noter que pour garantir avec certitude que ces dimensions seront respectées à terme, le constructeur est nécessairement amené à prendre des marges supplémentaires au stade de la construction.

Les panneaux de circulation directionnelle et de police sont placés au-dessus de la hauteur libre. Les hauteurs du panneau et des caractères des mentions doivent satisfaire aux prescriptions réglementaires en la matière et notamment la distance de lisibilité.

## b) Détermination de la largeur du profil en travers

Traditionnellement, la largeur du profil en travers s'étudie au niveau de la chaussée et la forme évasée des parements fait que la largeur du profil croît lorsque l'on s'élève depuis le sol.

L'avantage des ouvrages à gabarit réduit est également de pouvoir profiter des techniques modernes de construction, telle que le tunnelier, qui rendent réalisable les tunnels situés dans des conditions géotechniques et hydrogéologiques très difficiles. Dans de tels cas, la forme du profil en travers est imposée par la force circulaire du tunnelier. Dans le cas présenté en figure 4 (autoroute A86 à Paris), la configuration des parements dans les niveaux haut ou bas apparaît tout à fait particulière. Cet aspect doit nécessairement être pris en compte.

Pour cela, une nouvelle grandeur a été introduite, qui s'intéresse à la largeur entre piédroits à 1 m de hauteur, c'est-à-dire à la hauteur à laquelle l'utilisateur apprécie sa position relative par rapport aux parois latérales, ou aux autres véhicules qui roulent côte à côte.

La conception du profil en travers s'appuie finalement sur la détermination d'une largeur minimale au niveau de la chaussée, et d'une largeur minimale à 1 m de hauteur ; chacune d'entre elles reposant sur des outils d'évaluation différents :

- La largeur du profil en travers au niveau de la chaussée  
Cette largeur dépend de la largeur des voies, du nombre de voie, des accotements latéraux ainsi que des dispositions prises pour permettre aux usagers en panne de circuler en sécurité le long des parois.

Figure 3 shows all this data. It should be noted that if the constructor is to be sure of guaranteeing these dimensions in the finished structure he must allow extra margins when building.

Traffic signing and police signs must be placed above the headroom level. Sign heights and lettering must respect the appropriate regulations, particularly as far as visibility distance is concerned.

## b) Determining cross-section width

Cross section width is traditionally studied at pavement level and the flared shape of the facings means that cross section width increases as we measure higher up than ground level.

Another advantage of reduced height structures is that modern construction techniques such as tunnel boring machines can be used, thus making possible tunnels in geotechnically and hydrogeologically difficult conditions.

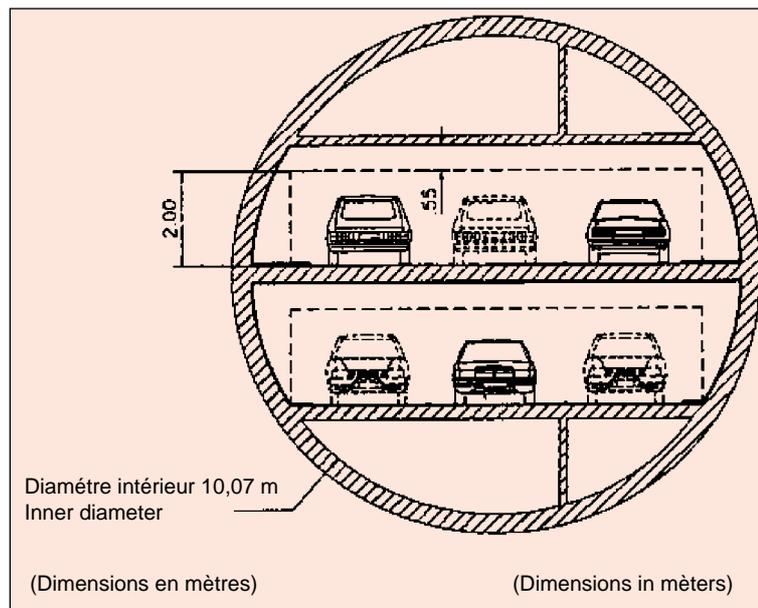
In such cases, the cross section shape is dictated by the tunneler's circular action. In the example shown in Figure 4 (the Paris A86 motorway), the specificity of the facings, both at high and low level, can be seen to be very special. This aspect has to be taken into account.

To do this a new measurement has been introduced - the width between side walls at a height of 1 metre, in other words the height at which users situate their position relative to

the side walls or other vehicles travelling alongside.

Cross section design is really based on the determination of a minimum width at pavement level and a minimum width at a height of 1 metre. Each of these widths is based on different assessment tools:

- Cross section widths at pavement level  
This depends on lane width and number, hard shoulders and arrangements made to enable stranded users to move about safely alongside the walls.



Profil en travers

Figure 4

Cross-section

• Les largeurs minimales de chacune des voies de circulation ont été fixées à :

- 2,80 m dans le cas du gabarit autorisé de 2 m
- 3,00 m dans le cas du gabarit autorisé de 2,70 m
- 3,50 m dans le cas du gabarit autorisé de 3,50 m

avec cependant la possibilité de restreindre à 2,80 m et 3 m respectivement la largeur des voies autres que celles utilisées par les véhicules les plus lents dans le cas des gabarits de 2,70 m et 3,50 m.

• La largeur des accotements latéraux est liée aux dispositions prises par l'exploitant, ainsi :

• en niveau TU3, une bande d'arrêt d'urgence de 2 m est prévue ainsi que des trottoirs latéraux. De ce fait, un véhicule en panne pourra attendre son dépannage sans perturber de façon significative la circulation. Les équipes d'intervention disposeront donc d'un laps de temps pour arriver sur les lieux.

• en niveau TU2, l'objectif de non-congestion impose que le véhicule en panne ne perturbe pas de façon excessive le trafic. Il faut donc que malgré une restriction locale de largeur, le nombre de voies de passage au droit du véhicule arrêté soit maintenu ; cela conduit à la mise en place de bandes dérasées latérales ou de trottoirs franchissables. En même temps, la surveillance du trafic et le système de détection des incidents doivent permettre une intervention rapide des équipes de secours, l'exploitant ayant également la possibilité de limiter l'importance du flux de circulation entrant dans le tunnel.

• en niveau TU1, il est envisageable que tout incident ou arrêt, immédiatement détecté et relayé par une intervention des secours, provoque l'obstruction de l'une des voies ; les usagers à l'arrêt devront donc se rabattre sur les autres files. On comprend l'importance qu'il y a à détecter instantanément l'anomalie, à informer au plus vite les usagers de la panne en aval, à gérer les files pour opérer le rabattement, à limiter les véhicules entrant si nécessaire, et bien sûr, à évacuer au plus vite le véhicule en panne. Des dispositions sont prises également pour que l'utilisateur n'ait pas à marcher au-delà de quelques pas dans le tunnel, mais puisse cependant communiquer avec le PC de surveillance.

La largeur du profil en travers au niveau de la chaussée repose donc essentiellement sur la prise en compte du cas de l'incident et des conditions de circulation au droit d'un véhicule arrêté.

• la largeur minimale à 1 m de hauteur

L'estimation de la largeur minimale à 1 m de hauteur s'appuie sur la largeur maximale des véhicules admis dans l'ouvrage que nous avons évaluée à 1,80 m pour le gabarit de 2,00 m, 2 m pour le gabarit de 2,70 m et 2,50 m pour le gabarit de 3,50 m, mais également sur deux notions beaucoup plus difficiles à quantifier : l'effet de paroi et l'interdistance latérale entre les véhicules.

• Minimum widths for each traffic lane have been decided as follows:

- 2.80 m for an authorized height of 2 metres
- 3.00 m for an authorized height of 2.70 m
- 3.50 m for an authorized height of 3.50 m

It is however possible to restrict to 2.80 m and 3 m respectively the width of lanes other than those used by the slowest vehicles having heights of 2.70 m and 3.50 m.

• The width of hard shoulders depends on the arrangements made by the operator, so:

• for Level TU3, a 2-metre emergency shoulder is included, as are footpaths. Thus a vehicle can wait for breakdown services without noticeable disturbance of the traffic flow, and such services have more time to get to the scene of the incident.

• for Level TU2, the non-congestion objective requires that vehicles in difficulty should not disturb traffic flow too much. In spite of local width restrictions therefore the number of lanes beside a stopped vehicle must be maintained - this leads to the installing of bevel-edged or crossable footpaths. At the same time traffic surveillance and incident detection systems should allow rapid intervention by emergency services, the operator also being able to restrict or reduce traffic flow into the tunnel.

• for Level TU1, it can be imagined that any incident or stopping, immediately detected and dealt with by emergency services, will result in the blocking of a lane; users who have stopped thus have to pull over onto the other lanes. This is why it is important to detect problems instantaneously, then to inform incoming users and direct traffic around the obstacle, limit vehicles entering if necessary and of course remove the broken-down vehicle as quickly as possible. Arrangements are made too so that users do not have to walk more than a few steps in the tunnel but can nevertheless communicate with the surveillance centre.

Cross section width at pavement level thus depends mainly on knowing when incidents happen and what circulation conditions are in the vicinity of a stopped vehicle.

• Minimum width at a height of 1 metre

Assessment of minimum width at a height of 1 m is based on maximum widths of vehicles allowed into the tunnel. We have calculated these at 1.80 m for the 2.00 m height, 2 m for the 2.70 m height and 2.50 m for the 3.50 m height, but there are also two other notions which are much more difficult to quantify - the wall effect, and the lateral distance between vehicles.

• L'effet de paroi quantifie la distance à laquelle l'utilisateur va tenir son véhicule de la paroi afin de se sentir en sécurité. Notre seule connaissance de cette grandeur provient de mesures in situ, pour certaines reprises par l'AIPCR, qui établissaient les trajectoires des véhicules.

• The wall effect determines the distance at which users keep away from the wall so as to feel safe. Our only knowledge of this distance comes from in situ measurements establishing vehicle trajectories, some of which have been adopted by PIARC.

En conclusion de ces études, la valeur finalement retenue est de 1,20 m pour une vitesse allant de 60 à 80 km/h.

At the end of these studies the value finally decided was 1.20 m for speeds from 60 to 80 km.p.h.

• L'interdistance latérale entre véhicules roulant de front dans le même sens a donné lieu à différentes études. Nous avons finalement retenu 1 m pour une vitesse de 60 km/h et 1,10 m pour 80 km/h. Il a été admis également, que sous réserve de laisser en place des moyens élaborés de gestion du trafic (niveau TU2 ou TU1), ces grandeurs pourraient être réduites de 10 cm voire de 20 cm sous la condition d'un strict contrôle des vitesses pratiquées.

• The lateral distance between vehicles travelling in the same direction has led to a variety of studies. We have finally settled for 1 metre for a speed of 60 km.p.h. and 1.10 m for 80 km.p.h. It is generally agreed that - provided that the sophisticated traffic management methods required for Levels TU2 and TU1 remain intact - these distances could be reduced by 10 cm or even 20 cm provided that actual speeds are strictly controlled.

La distance minimale entre piédroit à 1 m du sol se calcule donc comme la somme des effets de paroi gauche et droit (1,20 m pour chacun), de " n fois " la largeur maximale des véhicules admis et de " n - 1 fois " l'interdistance latérale entre véhicules; " n " étant le nombre de voies.

Minimum distance between side walls at a height of 1 m from ground level is therefore calculated as the sum of the effects of the left and right walls - 1.20 m for each - of "n times" the maximum width of authorized vehicles, and "n - 1 times" the lateral distance between vehicles, "n" being the number of lanes.

• Exemple :

• Example:

L'exemple ci-dessous, traitant du cas d'un tunnel à 3 voies au gabarit autorisé de 2,00 m et à parois verticales, permet de comprendre la démarche de conception géométrique. La vitesse de référence choisie est de 80 km/h.

The example below concerns a 3-lane tunnel with an authorized height of 2 metres and vertical walls. It illustrates how geometric design is undertaken. The reference speed chosen is 80 km.p.h.

• On prendra le niveau d'exploitation TU3, qui est celui du régime habituel des tunnels et des voies rapides urbains.

Level TU3 operation is retained because it is the most frequent for urban tunnels and fast roads.

On vérifie tout d'abord la condition de largeurs des véhicules et d'interdistances et distances aux parois.

Vehicles widths, inter-vehicle distances and distances from walls must first be examined.

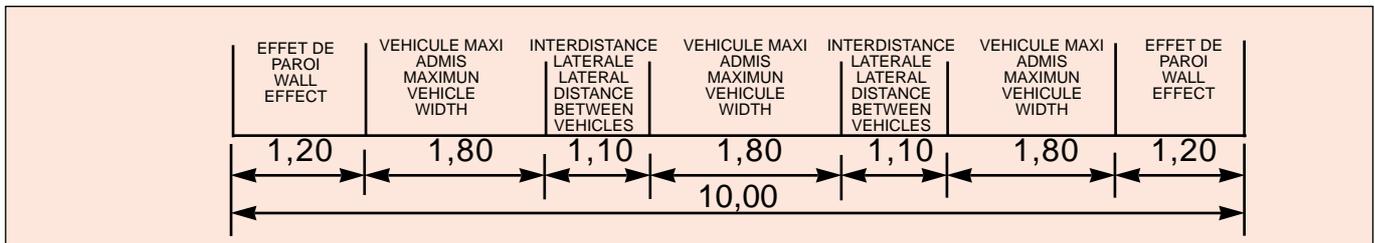


Figure 5

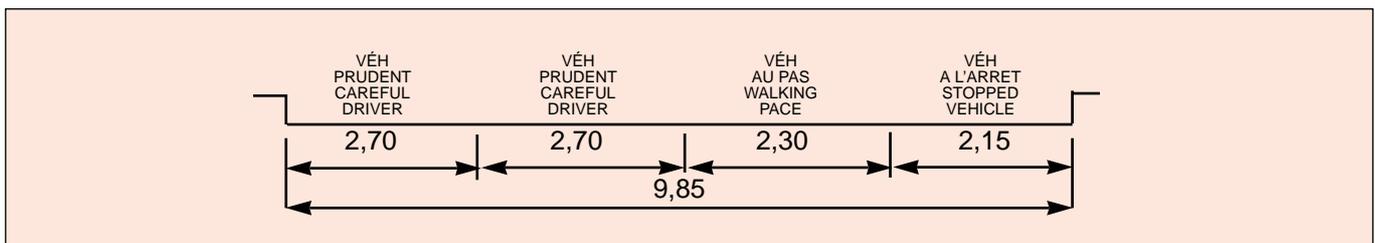


Figure 6

Puis on vérifie la condition de largeurs des voies et présences des BAU et trottoirs.  
Enfin, on vérifie la condition de possibilité de maintien du nombre de voies au droit d'un véhicule arrêté.

Lane widths, emergency shoulders and footways should then be examined.  
Lastly the number of lanes remaining available alongside a stopped vehicle should be examined.

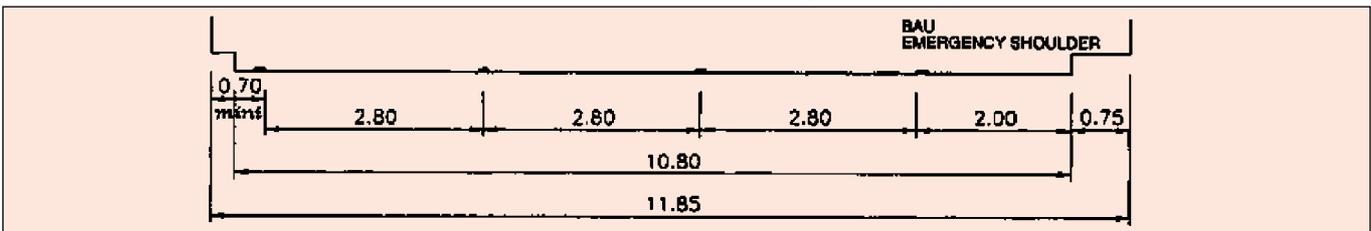


Figure 7

Ici, c'est la deuxième condition qui détermine la distance entre piédroit. Celle-ci devra être de 11,85 m.

Here the second condition determines the distance between sidewalls, which should be 11.85 metres.

Il est certain que cet article ne suffit pas pour détailler complètement l'ensemble des éléments du calcul ; l'objectif est davantage d'en faire comprendre les principales articulations. Les applications montreraient que pour des niveaux d'exploitation plus contraignants (TU2 et TU1), on pourrait accepter des distances entre piédroits plus courtes.

This article clearly cannot cover all the calculation requirements, the aim is rather to explain the main principles. The applications would demonstrate that for more constraining levels (TU2 and TU1) one could accept shorter distances between the sidewalls.

## IV - ÉLÉMENT COMPLEMENTAIRE CONCERNANT LES RACCORDEMENTS SOUTERRAINS

## IV - AN ADDITIONAL FACTOR IN UNDERGROUND CONNECTIONS

Les principes développés ci-avant peuvent également être utilisés pour définir la géométrie des éléments de liaison entre un ouvrage principal et la surface lorsque le tunnel compte des échangeurs intermédiaires. Seuls vont varier les données chiffrées qui sont liées à la vitesse de référence de l'ouvrage.

The foregoing principles may also be used to define the geometry of connection elements between the main structure and the surface when the tunnel includes intermediate interchanges. The only variable data concerns figures related to the structure's reference speed.

Une analyse doit aussi être faite en ce qui concerne le raccordement entre le tunnel principal (défini selon les principes du III) et des rameaux de sortie ou d'entrée. Le présent chapitre se propose d'étudier brièvement les quelques étapes majeures de la démarche utilisée pour la réflexion.

An analysis also has to be carried out to see how to connect the main tunnel (defined according to the principles in III) to entries or exits. This chapter will take a brief look at the main steps and the thinking process involved.

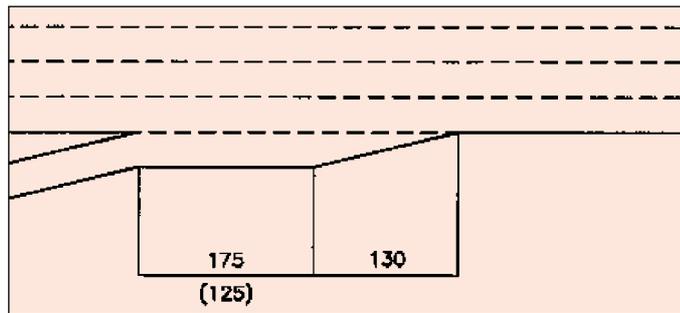
**IV.1. Examen des configurations minimales recommandées pour l'air libre et des conditions préalables nécessaires à leur transposition en souterrain**

**IV.1. An examination of minimum recommended outdoor configurations and the necessary prerequisites for their implementation underground**

Les caractéristiques géométriques des voies rapides urbaines en zone d'échange ont été fixées dans des

geometric characteristics for fast urban roads in exchange areas have been

textes normatifs (ICTAVRU). Ces valeurs sont normalement applicables aux tunnels. Elles présentent cependant l'inconvénient de nécessiter beaucoup d'espace et donc renchérissent très notablement le coût d'un ouvrage.



specified in norms (ICTAVRU). These values should normally apply to tunnels. Unfortunately, however, they require a lot of space and thus considerably increase structure costs.

Figure 8

A titre d'exemple, le dimensionnement d'une insertion sur chaussée directe nécessite une longueur de 255 m à 305 m comme indiqué ci-dessus.

By way of an example, design requirements

for direct insertion entry into a road are a length of 255 m to 305 m as shown above.

Pour limiter le coût de ces ouvrages, des réductions de longueur ont été envisagées, c'est ainsi qu'aux conditions :

To limit costs shorter lengths have been considered for these structures - in the following conditions for example:

- que le trafic entrant ou sortant soit faible et que le trafic du tunnel permette sans difficulté l'insertion des véhicules.
- que la géométrie des bretelles de sortie soit raisonnablement dimensionné.

- where entering and exiting traffic is of low volume and where tunnel traffic allows easy access for vehicles.
- where slip-road geometry is reasonably sized.

Il a été admis, dans le cas d'ouvrages à gabarit réduit, donc admettant une circulation plus homogène, de retenir des caractéristiques plus faibles, analogues à celles acceptées à l'air libre pour les raccordements entre bretelles (de bretelle à bretelle).

Lower level specifications similar to those acceptable for "open-air", slip-road-to-slip-road connections have been accepted in the case of reduced height structures which by definition have more standardized vehicles.

Dans l'exemple donné ci-dessus, la longueur du dispositif peut être ramené de 255 m à 187,50 m.

In the above example overall length can be reduced from 255 m to 187.50 m.

## IV.2. Examen des vitesses pratiquées dans les zones d'échange et des possibilités de les réduire

## IV.2. An examination of actual speeds in exchange zones, and how to reduce them

Les normes françaises définissent, pour les entrées et les sorties sur les voies rapides urbaines VRU, une vitesse pratiquée  $V_p$  correspondant à des conditions de circulation en file, pour des débits horaires voisins de 1200 à 1400 uvp/h.

French norms define speeds for private vehicles entering and leaving urban express roads. This speed is  $V_p$  and corresponds to in-line traffic flow of about 1,200 to 1,400 vehicles per hour.

La vitesse  $V_p$  est la vitesse avec laquelle les usagers vont calculer leur manoeuvre de sortie ou terminer leur manoeuvre d'insertion. Elle sert d'hypothèse à l'établissement d'un diagramme des vitesses dans les zones d'échanges et donc au calcul des caractéristiques géométriques des bretelles et à la vérification de la visibilité.

$V_p$  is the perceived speed at which users judge their exit manoeuvres, or finish their entry manoeuvres. It is a hypothetical speed from which charts can be drawn up concerning exchange areas. Slip road geometric characteristics and visibility verification can thus be calculated.

Il paraît admissible de réduire les hypothèses de 10 km/h sous réserve d'un haut niveau d'exploitation comprenant entre autres :

- la surveillance continue et totale de l'ouvrage et la détection automatique des incidents
- le contrôle des accès et la gestion des entrées et sorties
- un entretien sérieux de la chaussée et une vérification de ses qualités d'adhérence
- un traitement particulier de la zone de sortie (éclairage, identification de la bretelle par la couleur, ...)

Ces exigences regroupent les prescriptions propres aux niveaux d'exploitation TU1 ou TU2 (voir II)

De telles adaptations géométriques de l'air libre aux tunnels doivent se faire dans le respect d'un certain nombre de critères fondamentaux qui concernent :

- la visibilité sur obstacle
- la visibilité sur le musoir de sortie et sur la signalisation
- les décélérations ou accélérations longitudinales et transversales maximales

Il convient également d'attirer l'attention du concepteur sur le fait que, s'il est légitime de chercher à réduire des configurations prévues pour l'air libre et très coûteuses en souterrain, il est cependant important de veiller à ne pas cumuler les difficultés dans une même zone. Si des caractéristiques géométriques sévères peuvent être acceptables séparément, leur addition augmente notablement le risque d'accident.

## V - CONCLUSION

**a**insi, les méthodes proposées ci-dessus ont fortement mis l'accent sur l'importance des conditions d'exploitation pour définir de la façon la plus sûre raisonnablement possible des tunnels urbains adaptés aux véhicules particuliers.

On a abouti ainsi à des possibilités et des souplesses de conception qui devraient dans un proche avenir permettre le développement de tels souterrains.

Le premier projet est celui du bouclage de l'autoroute A86 Ouest dans la région parisienne, dont les travaux devraient commencer en 1996.

It would seem feasible to reduce hypothetical speeds by 10% provided that operating conditions are optimal and include:

- thorough ongoing surveillance of the structure and automatic detection of incidents
- control of access and entries and exits
- good pavement maintenance and checking of its adhesion qualities
- special treatment of exit zones, especially lighting, slip road identification by colour, etc.

These requirements are a roundup of the specific TU1 and TU2 (see II) operating recommendations.

Such "open-air" geometric considerations adapted to tunnels must be applied while respecting a certain number of basic criteria concerning:

- visibility of obstacles
- visibility of exit traffic island noses and signing
- maximum longitudinal and transversal decelerations and accelerations.

Designers' attention should also be drawn to the fact that while it is legitimate to try to reduce "open-air" configurations that are very costly underground, it is nonetheless important not to accumulate too many problems in the same place. Strict geometric characteristics that are individually acceptable may considerably increase accident risks when they are combined.

## V - CONCLUSION

**t**he foregoing methods stress the important role played by operating conditions when defining the best possible solutions for adapting urban tunnels to private vehicles.

We are thus discovering flexible design possibilities that should lead to the development of this sort of underground structure in the near future.

The first project is the completion of the West Paris A86 Motorway in the Paris region, where work is due to start in 1996.