

# 3. VITESSES DE CIRCULATION ET DENSITÉS DE TRAFIC

## 3.1 Caractéristiques générales du trafic

- Les mouvements de circulation dans un tunnel à double sens sont similaires, mais pas identiques à ceux des sections autoroutières à ciel ouvert. La capacité de transport est légèrement supérieure. Selon certains rapports [16], cela serait dû à un meilleur niveau de concentration des conducteurs et au nombre inférieur de manœuvres interrompant le flux de circulation.
- Le document de référence utilisé dans ce chapitre pour calculer la capacité est le manuel publié en 2000 [15], qui prend en compte différents types de routes à double sens. Ces types sont : les routes à deux fois une voie, caractérisées par une forte interaction entre les flux de circulation dans les deux sens, et les routes à deux fois n voies, dont les sens sont séparés par différents moyens allant des simples lignes de délimitation des voies aux barrières de sécurité. Sur les routes à deux fois n voies, les courants de circulation n'interagissent pas les uns avec les autres, ou alors faiblement.
- Sur une section de route à ciel ouvert, à deux fois une voie et sans barrière de sécurité entre les deux sens, il se produit de nombreuses interactions entre les deux flux de circulation. Cela signifie que le comportement des conducteurs dépendra en grande partie des possibilités de dépassement, si la distance de visibilité est suffisante et s'il n'existe aucun empêchement.
- Lorsque l'interaction entre les deux sens est très faible, soit parce qu'il existe une barrière de sécurité, soit en raison d'une règle de circulation routière interdisant le dépassement car il impliquerait d'envahir la voie circulant en sens inverse, le fonctionnement de la route est très semblable à celui d'une autoroute à deux fois n voies.
- Dans le cas d'un tunnel à deux fois une voie, le comportement du trafic est bien plus semblable à celui observé sur une autoroute à deux fois n voies que sur une route à deux fois une voie. Le phénomène prédominant dans les tunnels unidirectionnels, de plus en plus nombreux sur les routes, à savoir que les conducteurs, trop accoutumés, ne sont pas particulièrement attentifs lorsqu'ils roulent à l'intérieur d'un tunnel, n'est pas aussi fréquent. En outre, même à l'heure actuelle, les conducteurs renforcent leur vigilance lorsqu'ils pénètrent dans un tunnel bidirectionnel et sont conscients que le dépassement est interdit. Selon certaines études [10, 11], les positions des véhicules sur les voies, à l'intérieur des tunnels, sont beaucoup plus rapprochées que sur les routes à ciel ouvert, ce qui confirme que les conducteurs font plus attention.

# 3. TRAFFIC SPEED AND DENSITIES

## 3.1 General features of the traffic

- The movement of traffic in a two-way tunnel is similar, but not identical to that of similar open sections of highway. There appears to be a slightly higher carrying capacity in the tunnel. According to some reports [16] this is due to the higher level of concentration of drivers and fewer manoeuvres that cause interruptions in the flow of vehicles.
- The reference used in this section for calculating capacity is the Highway Capacity Manual published 2000 [15], which considers different roadway types for two-way traffic. These types are: roadways with two traffic lanes and bi-directional, characterised by the intense interaction between the flows in both directions, and multiple lane roadways with two-way traffic, both directions being separated by various means, from a physical barrier, to simple traffic lane markings. On multiple lane roadways the traffic flows do not interact with each other or do so to a slight degree.
- On a section of open roadway, with one traffic lane in each direction and without physical separation between the traffic, there is a great deal of interaction between the two traffic flows. This means that the behaviour is highly influenced by the possibility of overtaking, after checking that there is sufficient visibility distance, and the absence of any other impediments.
- When the interaction between directions is very slight, either because there is a physical separation or because of a road rule that does not permit overtaking under any circumstances because it requires invading the lane travelling in the opposite direction, the operation of the road is to a great extent similar to that of a multiple lane highway.
- In the case of a two lane tunnel with one lane of traffic in each direction of travel, there are many more similarities to the behaviour of multiple lane highway than to that of a two-way roadway. In this case the phenomenon, predominant in one-way tunnels because of their growing presence on the roads, of drivers not paying any special attention when driving through a tunnel because they have become accustomed to them, is not so common. On the other hand, even today, going through a two-way tunnel heightens driver attention, and drivers are also aware that there is no overtaking in the tunnel. According to certain studies ([10], [11]), the distribution of the positions of the vehicles in the traffic lanes in a tunnel places them much closer than outside, providing further evidence of this phenomenon of greater attention to driving.

- Le cas des tunnels à deux fois n voies est encore plus souvent similaire à celui des autoroutes à deux fois n voies. Les tunnels bidirectionnels à plus de quatre voies de circulation ne sont pas très courants, sauf en zone urbaine, et en général, ils possèdent un terre-plein central avec barrière de sécurité. Les tunnels à deux fois n voies dont les conditions géométriques et d'éclairage sont très bonnes peuvent même fonctionner comme des tunnels unidirectionnels. Dans ce cas, la capacité et les vitesses doivent être étudiées conformément à la procédure décrite au chapitre correspondant du document « Géométrie de la section transversale des tunnels routiers à circulation unidirectionnelle » AIPCR - Mars 2001 [1].
- La présence d'une voie en rampe, à l'intérieur du tunnel, est un cas particulier. Une décision doit alors être prise sur les conditions déterminant les courants de circulation, dans chaque situation spécifique :
  - si la voie supplémentaire fonctionne essentiellement comme une voie réservée aux poids lourds roulant à une vitesse bien inférieure à ceux de la voie rapide, elle se comportera comme une voie en rampe typique ;
  - si la voie supplémentaire est empruntée par tous les types de véhicules, qu'elle fonctionne de manière similaire aux autres voies et qu'elle sert uniquement à augmenter la capacité de la route, elle doit être considérée comme une voie de circulation sur une autoroute à deux fois n voies.
- Lors de l'étude de capacité, il faut décider si l'on examinera différentes sections du tunnel séparément ou bien le tunnel dans sa totalité. Évidemment, si le profil en travers varie, la section minimale définira la capacité de l'ensemble de l'ouvrage. En ce qui concerne le profil en long, il faut étudier la possibilité d'englober plusieurs rampes de différentes pentes en une seule rampe de pente moyenne ou d'examiner chaque rampe séparément. Dans ce dernier cas, plusieurs estimations doivent être faites pour déterminer le point où la capacité est la plus limitée. Il correspond habituellement au point où les poids lourds circulent le plus lentement.
- En résumé, et avec les limitations indiquées, ce chapitre décrit les variations dans les flux de circulation à l'intérieur d'un tunnel bidirectionnel, en fonction des variations dans la géométrie et le tracé, ainsi que des variations et de la composition du trafic. À cette fin, les calculs du manuel [15] et de plusieurs autres études ont été adaptés au cas des tunnels bidirectionnels ayant un nombre maximal de quatre voies. Les tableaux des coefficients et les procédures générales utilisés sont extraits du manuel [15], même si parfois, la présentation des calculs diffère de celle du document de référence. La seule exception est constituée par les facteurs d'équivalence applicables aux camions sur rampe, extraits de la version 1995 du manuel [14]. En effet, ceux obtenus dans la version 2000 sont applicables aux camions présentant un rapport puissance/poids élevé et ne s'adaptent pas bien au comportement habituellement observé dans la majorité des pays.

- The case of bi-directional tunnels with several traffic lanes in the same direction is usually even more closely related to multiple lane highways. Bi-directional tunnels with more than four lanes of traffic in total are not very common except in urban areas, and generally they have a median strip with physical separation. In the case of tunnels with several lanes of traffic in each direction, especially if the geometric conditions and illumination are of the highest quality, they may even behave like uni-directional tunnels, in which case the capacity and speeds should be studied in accordance with the procedure of the corresponding paragraph of the document "Cross section geometry of uni-directional road Tunnels", PIARC - March 2001 [1].
- A special case is the presence of a climbing lane in the ascending direction of the tunnel. In this case a decision should be made regarding the conditions prevailing in the traffic flow for each particular case:
  - If the additional traffic lane mainly behaves as specialised in heavy vehicles which travel at a speed far below the vehicle traffic in the fast lane, the behaviour is that of a typical climbing lane.
  - If all types of vehicles use the additional traffic lane, and its operation is similar to the other traffic lanes, only providing increased capacity, it should be regarded as a traffic lane on a multiple lane highway.
- When making a capacity study it must be defined whether sections of the tunnel are to be considered separately, or the complete tunnel as a whole. Of course, if the cross section varies, the minimum section will define the capacity of the whole. In regard to the longitudinal section, a study should be made of combining a series of ramps with various gradients into a single ramp of average gradient, or whether each should be studied separately. In these cases various estimates should be made to determine the point which most limits the capacity. This usually coincides with the point of the slowest speed for heavy vehicles.
- In summary, and with the limitations mentioned, this section describes the variations in the traffic flow inside a bi-directional tunnel in accordance with the variations in geometry and layout, and the variations and composition of traffic requirements. To this end, the determinations of the Highway Capacity Manual 2000 [15], as well as various other studies have been adapted to the case of bi-directional tunnels with a maximum of four traffic lanes in total. The tables of coefficients and general procedures used are extracted from HCM 2000 [15], although, on occasions, the presentation of the calculations differs from that of the reference document. One exception is the equivalence factors for trucks on a ramp which originate from the 1995 version of HCM [14], as those in the 2000 version have been obtained for trucks with a high power / weight ratio and do not effectively adapt to the usual behaviour in the majority of countries.

## 3.2 Calculs de vitesse et de capacité

La procédure d'estimation de la capacité d'un tunnel exige de calculer séparément les capacités partielles pour chaque sens de circulation.

Dans le cas le plus fréquent, c'est-à-dire celui d'une seule voie par sens de circulation, la capacité est calculée en utilisant la méthode applicable aux voies d'usage général, comme expliqué plus loin. Par ailleurs, s'il existe plus d'une voie par sens de circulation, l'analyse doit commencer par la détermination du flux de circulation prédominant pour chaque sens de circulation, dans des conditions de trafic dense, c'est-à-dire dans des conditions proches d'une situation de pleine capacité ou de saturation. Comme indiqué plus haut, il se peut que les deux voies de circulation soient occupées à peu près de la même façon par tous les types de véhicules, ou bien que la voie lente soit exclusivement réservée aux poids lourds et peu ou pas du tout occupée par des véhicules légers.

Dans ce dernier cas, les facteurs distinctifs sont généralement l'existence de pentes ascendantes ou descendantes importantes et un pourcentage élevé de poids lourds tendant à utiliser la voie lente comme voie en rampe. En revanche, une configuration avec peu ou pas de poids lourds tend à reproduire des situations similaires à celle d'une route à deux fois n voies. À l'intérieur des tunnels, dans des situations proches de la pleine capacité, toutes les voies tendent à être utilisées de façon similaire, avec un pourcentage légèrement supérieur de poids lourds sur la voie lente ; dans des conditions de trafic fluide, les camions tendent à occuper exclusivement la voie en rampe, utilisant la voie rapide uniquement pour le dépassement. À cet égard, la société chargée de l'exploitation doit veiller à ce que les voies rapides d'un tunnel à deux fois n voies soient uniquement utilisées lorsque la capacité de la voie lente est insuffisante pour gérer un trafic dense. En effet, la sécurité du trafic est meilleure lorsqu'il y a une voie libre entre les deux sens de circulation, à l'intérieur du tunnel. Évidemment, s'il est interdit aux poids lourds de dépasser d'autres poids lourds dans le tunnel, la voie rapide ne sera pas occupée par ce type de véhicules. Cette mesure de contrôle tend à accroître la sécurité dans des conditions de trafic faible à moyen, mais peut limiter la capacité du tunnel puisque la vitesse de circulation sur la voie lente sera obligatoirement celle du véhicule le plus lent.

Si la situation la plus courante est celle d'une voie lente utilisée comme voie en rampe, la procédure doit consister à déterminer d'abord la capacité de la voie en rampe puis celle de la voie rapide, très peu ou pas du tout occupée par des poids lourds. Dans un premier temps, on calcule la capacité d'une voie normale ou de deux voies ayant essentiellement le même usage. Puis on estime la capacité supplémentaire assurée par une voie en rampe.

### 3.2.1 Capacité théorique et capacité pratique

Distinguons la capacité théorique d'une section de route, définie par la densité maximale supportée pendant une période de quinze minutes et exprimée en termes de véhicules par heure. Ce chiffre n'est pas un maximum absolu : il se fonde sur une répétabilité raisonnable. Ainsi exprimée, la capacité ne dépend que de la géométrie de la section. Elle ne dépend pas du pourcentage de poids lourds, puisqu'il est évident que cette densité sera maximale lorsque le trafic sera uniquement composé de véhicules légers et d'usagers réguliers.

Si l'on préfère que la capacité se rapporte au nombre de véhicules, en prenant en compte le pourcentage de poids lourds, il faut calculer la capacité pratique. Celle-ci est définie par la densité horaire maximale de véhicules pouvant circuler sur cette section pendant une période de quinze minutes, en fonction de la composition du trafic prédominant à cet endroit.

## 3.2 Speed and capacity calculations

The procedure for estimating the capacity of a tunnel involves individual and separate determinations of the partial capacities for each of the directions of travel.

In the most frequent case, that of a single traffic lane in each direction, the capacity is calculated using the method for traffic lanes of general use as explained below. On the other hand, if there is more than one traffic lane in one direction, the analysis first involves a determination of the predominating traffic flow for each direction of travel in the tunnel under conditions of high traffic intensity, that is under conditions close to the situation of full capacity or saturation. As indicated above, it may be that the slow lane is exclusively specialised in heavy vehicles, with little or no presence of light vehicles, or even that both traffic lanes are to approximately the same extent occupied by all types of vehicles.

The differentiating factors for these cases are usually the existence of sharp upward or downward grades and a high percentage of heavy vehicles which tend to use the slow lane as a climbing-lane, whereas a layout with little or no presence of heavy vehicles tends to reproduce situations similar to that of a multiple lane roadway. In tunnels, under conditions close to capacity, the traffic lanes tend to be used in a similar way with a slightly greater presence of heavy vehicles in the slow lane, whereas under reduced traffic density trucks tend to exclusively occupy the climbing lane, only using the fast traffic lane to overtake. In this regard, the company responsible for operating the tunnel should make an effort to ensure that the fast lanes of a tunnel with more than one traffic lane in each direction are only used if the capacity of the slow lane is insufficient to handle the traffic density, as the safety of traffic is greater if there is a free traffic lane between both directions in the tunnel. Of course, in the event that heavy vehicles are prohibited from overtaking other heavy vehicles in the tunnel, the fast traffic lane will be free of this type of vehicles. This measure of control tends to increase the safety under conditions of low to medium traffic intensity, but may limit the capacity of the tunnel as it imposes the condition that the speed in the slow lane is that of the slowest vehicle.

If the predominant situation is a slow lane specialised as a climbing-lane, the procedure should be to first determine the capacity of the climbing-lane, and then that of the fast traffic lane with very few or no heavy goods vehicles. The first stage of the procedure is to calculate the capacity of a normal traffic lane, or of two with a predominantly similar use. An estimate is then made of the additional capacity provided by a climbing-lane.

### 3.2.1 Theoretical Capacity and Practical Capacity.

One should distinguish the Theoretical Capacity of a road section, which is defined as the maximum intensity of vehicles that can be maintained during a period of fifteen minutes, expressed in terms of vehicles per hour. This is not an absolute maximum, but rather refers to reasonable repeatability. Expressed in this way, the capacity only depends on section geometry. It does not depend on the percentage of heavy vehicles, since it is clear that this intensity will be maximum when traffic is formed exclusively by light vehicles and regular drivers.

If one would like the capacity to refer to the number of vehicles, taking into account the percentage of heavy vehicles, the Practical Capacity is expressed. This is defined as the maximum intensity per hour of vehicles that can cross this section in a fifteen-minute period, with the composition of traffic that prevails in that location.

### 3.2.2 Capacité des voies d'usage général

Ce paragraphe est applicable à tous les cas où une seule voie est prise en compte pour chaque sens de circulation, ainsi que pour calculer la capacité de la voie rapide lorsque la voie lente est une voie en rampe qui doit être prise en compte séparément. Il est également utile pour déterminer la capacité totale de deux voies ayant un usage similaire pour un même sens de circulation.

La capacité est déterminée en deux étapes. Dans un premier temps, on calcule la capacité théorique à partir de la vitesse en régime fluide (VRF). Puis on ajuste la capacité théorique en fonction du pourcentage de poids lourds et du type de conducteurs, pour obtenir la capacité pratique.

La VRF est la vitesse moyenne des véhicules légers, lorsqu'il y a peu de trafic obligeant certains véhicules à retarder les autres. La VRF peut être déterminée par observation directe, en s'assurant que la densité de la voie en question ne dépasse pas 1 400 vp/h (voitures particulières par heure) et qu'il n'y a pas d'autres types de véhicules. Si la VRF est mesurée directement, aucun ajustement n'est nécessaire, mais il faut prendre soin de mesurer correctement la vitesse sur toute la longueur du tunnel ou de la section de tunnel à l'étude. Ces vitesses doivent être calculées en mesurant les temps de parcours sur toute la section, et non en calculant la vitesse moyenne à un point quelconque de la section, car cette procédure entraînerait des résultats erronés.

S'il n'est pas possible d'utiliser l'observation directe, on peut fonder ses calculs sur la vitesse de base en régime fluide (VBRF), qui ne dépend que de la géométrie du tunnel et des vitesses limites imposées. On peut également estimer que cette vitesse est légèrement inférieure (de 5 à 10 km/h) à la vitesse de base de la section, ou légèrement supérieure (de 8 à 15 km/h) à la vitesse limite imposée.

Lorsqu'elle est fondée sur la VBRF, la VRF est déterminée par application des coefficients de réduction dépendant des éléments suivants :

- $C_A$  : largeur des voies, lorsqu'elle est inférieure à 3,60 m ;
- $C_W$  : dégagement de chaque côté du sens de circulation (hors-chaussée + terre-plein central, s'il y en a) ;
- $C_M$  : type de séparation entre les sens de circulation.

$$VRF = VBRF - C_A - C_W - C_M$$

### 3.2.2 Capacity of traffic lanes for general use.

This section is applicable to all cases where there is a single traffic lane in the direction of travel being considered, as well as for calculating the capacity of the fast traffic lane whenever the slow lane is a climbing-lane, which should be considered separately. This section can also be applied to the case of determining the total capacity of the combination of two traffic lanes with a similar use in the same direction of travel.

The capacity is determined in two steps; the first is to calculate the theoretical capacity on the basis of the free flow speed (FFS). The second step is to adjust this theoretical capacity depending on the presence of heavy vehicles and the type of drivers to obtain the practical capacity.

The FFS is the space mean speed of light vehicles when there is not much traffic that causes some vehicles to delay others. The FFS can be determined by direct observation, making sure that the intensity on the traffic lane in question is not more than 1400 pcph (passenger cars per hour), and that no other types of vehicles are present. If the FFS is measured directly, no other adjustments are necessary, but care should be taken to correctly measure the speed over the whole length of the tunnel or the section of tunnel under study. These speeds should be calculated by measuring travel times over the complete section, and not by calculating the average of the speed at any one point as this would lead to erroneous results.

If it is not possible to use direct observation, the calculations may be based on the Basic Free Flow Speed (BFFS), which is only dependent on the geometry of the tunnel and the speed limits imposed. It may also be estimated as somewhat less (5 to 10 km/h) than the design speed of the section, or as slightly higher than (8 to 15 km/h) than the traffic speed limit enforced.

When based on the BFFS the FFS is determined by applying reduction factors that depend on:

- $F_A$  - The width of the traffic lanes, when less than 3.60 m (12 ft)
- $F_W$  - The side clearance on both sides of the direction of travel (off-carriageway + central median strip, if present)
- $F_M$  - The type of separation between directions of travel.

$$FFS = BFFS - F_A - F_W - F_M$$



Le coefficient d'ajustement pour la largeur des voies, ainsi que le coefficient d'ajustement pour le dégagement latéral, sont indiqués sur les tableaux ci-dessous.

Ajustement pour la largeur des voies $C_A$	
Largeur de la voie	Réduction de la VBRF (en km/h)
3,60 m	0,0
3,50 m	1,0
3,40 m	2,1
3,30 m	3,1
3,20 m	5,6
3,10 m	8,1
3,00 m	10,6

Ajustement pour le dégagement latéral $C_W$	
Largeur totale du dégagement latéral	Réduction de la VBRF (en km/h)
3,60 m	0,0
3,00 m	0,6
2,40 m	1,5
1,80 m	2,1
1,20 m	3,0
0,60 m	5,8
0,00 m	8,7

La largeur des voies ne doit pas inclure les lignes de délimitation des voies, sauf celles entre les voies circulant dans le même sens, considérées comme incluses dans les voies adjacentes.

Le dégagement latéral doit comprendre toute la zone hors-chaussée plus le terre-plein central séparant les deux sens de circulation, s'il y en a un. Les calculs ne prennent en compte aucune largeur supérieure à 1,80 m pour l'un ou l'autre coefficient. Cela signifie que les largeurs de hors-chaussée et de terre-plein central supérieures à 1,80 m sont considérées comme égales à 1,80 m. Les largeurs de trottoirs sont incluses dans le dégagement latéral sauf si les trottoirs sont nettement élevés par rapport à l'accotement ou s'il existe des barrières rigides ou souples délimitant le trottoir. Si la séparation entre les sens de circulation n'est assurée que par une ligne simple ou double, peinte sur la chaussée, le terre-plein central est égal à zéro.

Le coefficient de réduction pour le type de séparation centrale,  $C_M$ , n'est pris en compte que s'il n'existe pas de barrière fixe entre les sens de circulation, ni de terre-plein central, et a une valeur de 2,5 km/h. Cette valeur correspond à l'effet d'insécurité causé par une circulation à double sens, moins ressenti par les conducteurs lorsqu'il existe une barrière ou une bande centrale séparative.

Une fois la VRF déterminée en km/h, par observation directe ou par application des coefficients de réduction à la VBRF, la capacité théorique par voie (CP/v) est calculée comme suit :

$$CP/v = (VRF \times 10 + 1\ 200) \quad (\text{voitures particulières par heure et par voie})$$

Cela signifie que pour une VRF de 70 km/h, la CP/v est de 1 900. Il n'a pas été possible de déterminer de capacités théoriques au-dessus de 2 200 et il n'existe pas de données fiables pour les vitesses en régime fluide inférieures à 60 km/h.

S'il existe deux voies pour le même sens de circulation et que la voie lente n'est pas une voie en rampe, la capacité du tunnel pour ce sens de circulation est le double de celle d'une voie de circulation.

The adjustment factor for the width of the traffic lanes is indicated in the tables below, together with the adjustment factor for side clearance.

Adjustment for width of traffic lanes $F_A$	
Width of traffic lane	Reduction of the BFFS (in km/h)
3.60 m.	0.0
3.50 m.	1.0
3.40 m.	2.1
3.30 m.	3.1
3.20 m.	5.6
3.10 m.	8.1
3.00 m.	10.6

Adjustment for side clearance $F_W$	
Total width of Side Clearance	Reduction of the BFFS (in km/h)
3.60 m.	0.0
3.00 m.	0.6
2.40 m.	1.5
1.80 m.	2.1
1.20 m.	3.0
0.60 m.	5.8
0.00 m.	8.7

The width of traffic lanes should not include the traffic lane markings, except traffic lane markings between traffic lanes in the same direction of travel, which are considered as included in adjacent traffic lanes.

The side clearance should be considered as the total of the off-carriage way plus the central median strip separating directions of travel, if it exists. The calculation does not take any widths in excess of 1.80 m. into consideration for either of the two factors. This means that widths of off-carriageway that exceed 1.80 m. are considered as 1.80, and central median strips in excess of this value are also considered to have a value of 1.80. The widths of walkways are included in the side clearance unless they are considerably raised above the hard clearance or there are either rigid or flexible barriers separating the limit of the walkway. If the separation between directions of travel is only a line, single or double, painted on the pavement, the central side clearance is zero.

The reduction factor for the type of median strip  $F_M$ , is only taken into account if there are no fixed barriers between directions of travel nor a central median strip, and has a value of 2.5 km/h. This reduction is due to the effect of insecurity caused by traffic in both directions and which does not affect drivers so much when there is a median barrier or a central safety strip.

Once the FFS, in km/h, has been calculated from direct observation or by reduction factors applied to the BFFS, the Theoretical capacity per traffic lane (TCpl) is calculated from:

$$TCpl = ( FFS \times 10 + 1200 ) \quad (\text{in passenger cars per hour per lane})$$

This means that for a FFS of 70 km/h, the TCpl is 1900. It has not been possible to determine theoretical capacities above 2200, and no reliable data is available for free flow speeds below 60 km/h.

If there are two traffic lanes in the same direction of travel, and the slow lane is not a climbing-lane, the capacity of the tunnel in this direction is double that of a single traffic lane.

La capacité théorique CT/v est alors utilisée pour obtenir la capacité pratique CP/v par application des coefficients de réduction suivants :

- Coefficient lié à l'heure de pointe  $C_{HP}$ , représentant le débit horaire divisé par quatre fois le nombre maximal de véhicules pendant une période de quinze minutes, au cours de l'heure de pointe. Ce coefficient indique la dispersion des densités au cours de l'heure de pointe et est utilisé pour calculer la capacité pratique, exprimée en termes de densité maximale supportable pendant une période de 15 minutes. Il varie habituellement de 0,92 (cas où le flux est très uniforme) à 0,80. On peut l'obtenir à partir d'observations ou utiliser des valeurs par défaut.
- Coefficient lié au type de conducteur  $C_C$ , en fonction du degré de connaissance et d'habitude du tunnel. Les valeurs varient de 1,00 à 0,85. La valeur de 1,00 s'applique aux conducteurs circulant régulièrement dans le tunnel ; la valeur de 0,85 s'applique à ceux conduisant à l'occasion de leurs loisirs ou n'ayant pas emprunté auparavant ce tunnel ni d'autres tunnels similaires.
- Coefficient lié aux poids lourds sur chaussée en pente  $C_{PL}$ , indiquant l'effet des types de véhicules lents sur le flux de véhicules légers.

Le coefficient d'ajustement lié au pourcentage de poids lourds  $C_{PL}$  s'obtient à partir du coefficient d'équivalence  $E_Q$  d'un poids lourd (autobus ou camion) parmi des véhicules légers. Il est déterminé par le rapport entre la demande de capacité pour les poids lourds (camions, autobus, semi-remorques) et la demande de capacité pour les voitures particulières. Le coefficient d'équivalence  $E_Q$  varie de 1,5 à 10 pour les camions et autobus, en fonction de la longueur et de la pente. Ses valeurs sont indiquées dans le tableau ci-après.

Une fois le facteur  $E_Q$  déterminé en fonction de la longueur de la pente, ainsi que du pourcentage de poids lourds, le coefficient  $C_{PL}$  est calculé comme suit :

$$C_{PL} = \frac{1}{(1 + P_C (E_Q - 1))}$$

Où  $P_C$  est le pourcentage de poids lourds dans le volume total de trafic.

La capacité pratique CP est calculée en multipliant la capacité théorique CT par les trois coefficients.

$$CP = CT * C_{HP} * C_{PL} * C_C$$

The theoretical capacity, TCpl, is then used to obtain the Practical Capacity, PCpl, by applying reduction factors to compensate for:

- The peak hour factor, PHF, which represents the relationship of the hourly intensity in capacity divided by four times the maximum number of vehicles in a period of fifteen minutes during peak hour. This factor includes the dispersion of the intensities over the peak hour period, and is used to calculate the practical capacity which is expressed in terms of the maximum sustainable intensity over periods of 15 minutes. This factor usually varies between 0.92, for cases where the flow is highly uniform, to 0.80. Its value should either be obtained by observation, or default values used.
- The factor for type of driver,  $f_p$ , is based on the degree of awareness and habitual use of the tunnel by drivers. The value ranges from 1.00 to 0.85, the value of 1.00 being applied to drivers that use the tunnel on a regular basis, and 0.85 for a population with recreational behaviour, or who have not previously used this or other similar tunnels.
- The factor for heavy vehicles on grades,  $f_{HV}$ , indicates the effect of the types of slow vehicles on the flow of light vehicles.

The factor to adjust for the presence of heavy vehicles  $f_{hv}$  is obtained from the Equivalence Factor  $E_q$  of a heavy vehicle (bus or truck) among light vehicles. It is determined as the relation between the demand of capacity for heavy vehicles (lorries, buses, trailers) and the demand of capacity for a private car. The Equivalence Factor  $E_q$  varies between 1.5 and 10 for lorries and buses, depending on the length and grade of the slope. Its values are stated in the table below.

Once the  $E_q$  factor has been determined, depending on inclination and length of the grade, and percentage of heavy vehicles, the  $f_{hv}$  is calculated by:

$$f_{hv} = \frac{1}{(1 + P_c (E_q - 1))}$$

Where:  $P_c$  is the proportion of heavy vehicles in the total traffic flow.

The Practical Capacity,  $C_p$ , is calculated by multiplying the theoretical capacity,  $T_c$ , by the above three factors.

$$C_p = T_c * PHF * f_{hv} * f_p$$

Pente (%)	Longueur de la rampe (m)	Coefficient d'équivalence $E_Q$ sur voie en rampe					
		Pourcentage de poids lourds (%)					
		4	6	8	10	15	20
< 2	Toutes	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	800 - 1 200	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1 200 - 1 600	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
	1 600 - 2 400	3	3	2,5	2,5	2	2
	> 2 400	3,5	3	2,5	2,5	2	2
3	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	2,5	2	2	2	2	1,5
	800 - 1 200	4	3,5	3,5	3	2,5	2
	1 200 - 1 600	5,5	4,5	4	4	3,5	3
	1 600 - 2 400	6	5	4,5	4	4	3
	> 2 400	6	5	4,5	4,5	4	3
4	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	4	3,5	3	3	3	2,5
	800 - 1 200	7	6	5,5	5	4,5	4
	1 200 - 1 600	8	6,5	6	5,5	4	4,5
	> 1 600	8	7	6	6	5	5
5	0 - 400	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	4,5	4	3,5	3	3	2,5
	800 - 1 200	7	6	5,5	5	4,5	4
	1 200 - 1 600	9	8	7	7	6	6
	1 600 - 2 400	9,5	8	7,5	7	6,5	6
	> 2 400	9,5	8	7,5	7	6,5	6

### 3.2.3 Capacité d'une voie en rampe

Lorsque la voie lente est une voie en rampe, sa capacité pratique peut être estimée approximativement à partir de la densité totale de poids lourds que la voie peut supporter en fonction de sa pente et de sa longueur. On peut utiliser la formule suivante :

$$CP_{vr} = (10 * V_{pl} + 1\ 200) / E_C$$

Où  $V_{pl}$  est la vitesse moyenne des poids lourds sur la chaussée en pente dans des conditions de trafic dense. Si elle ne peut pas être observée directement, elle peut être estimée à l'aide de l'expression suivante :

$$V_{pl} = [ 0,30 * (\text{puissance} / \text{poids}) ] / ( i + 0,015 )$$

Où le rapport puissance / poids des poids lourds est exprimé en kW par tonne et la pente  $i$ , par un ratio d'un pour un<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Cette formule permet d'estimer la vitesse constante des poids lourds sur une pente prolongée, sans prendre en compte l'effet de la résistance de l'air et en supposant que la capacité de transmission du moteur du camion est de 80 % et que le coefficient de résistance à la chaussée est de 15 kgm / tonne.

Inclination (%)	Length of ramp (m)	E <sub>q</sub> Equivalence factor in ramps					
		Percentage of heavy vehicles ( % )					
		4	6	8	10	15	20
< 2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2	0-400	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	400-800	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	800-1200	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	1200-1600	2	2	1.5	1.5	1.5	1.5
	1600-2400	3	3	2.5	2.5	2	2
	> 2400	3.5	3	2.5	2.5	2	2
3	0-400	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	400-800	2.5	2	2	2	2	1.5
	800-1200	4	3.5	3.5	3	2.5	2
	1200-1600	5.5	4.5	4	4	3.5	3
	1600-2400	6	5	4.5	4	4	3
	> 2400	6	5	4.5	4.5	4	3
4	0-400	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	400-800	4	3.5	3	3	3	2.5
	800-1200	7	6	5.5	5	4.5	4
	1200-1600	8	6.5	6	5.5	4	4.5
	> 1600	8	7	6	6	5	5
5	0-400	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	400-800	4.5	4	3.5	3	3	2.5
	800-1200	7	6	5.5	5	4.5	4
	1200-1600	9	8	7	7	6	6
	1600-2400	9.5	8	7.5	7	6.5	6
	> 2400	9.5	8	7.5	7	6.5	6

### 3.2.3 Capacity of a climbing-lane

In the event that the slow lane is a climbing-lane, the practical capacity can be approximately estimated from the total intensity of heavy vehicles that the traffic lane can carry considering its inclination and length. The following formula could be used:

$$PC_{cl} = (10 * V_{HGV} + 1200) / E_T$$

Where  $V_{HGV}$  is the mean speed of the heavy vehicles on the incline under conditions of high traffic intensity. If this cannot be observed directly, it may be estimated from the following expression:

$$V_{HGV} = [ 0.30 * (\text{Power} / \text{weight}) ] / ( i + 0.015 )$$

Where the ratio of power / weight of the heavy vehicles is expressed as kW per ton weight, and the inclination of the grade "i" as a ratio of one.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> This formula approximates the steady speed of heavy vehicles on prolonged inclines, disregarding the effect of air resistance, and assuming that the performance of the motor-transmission of the truck is 80%, and the coefficient of resistance to the roadway is 15 kgm / Ton.

$E_C$  est l'équivalent pour les poids lourds ou les camions, calculé à partir des chiffres du tableau ci-dessus, présentés dans la colonne correspondant à 20 % ou plus de poids lourds. Si le nombre de camions et de poids lourds n'est pas assez élevé pour saturer la voie en rampe, la capacité de cette dernière n'est pas totalement utilisée. Quelques voitures particulières circulent entre les camions sur les voies réservées aux véhicules lents. Mais la capacité restante est très rarement exploitée au mieux.

Ainsi, une voie en rampe d'une longueur de 3 000 m et d'une pente de 3 % donne un  $E_C$  de 3,0, alors que la vitesse moyenne  $V_{pl}$  pour les camions d'une puissance de 8 kW/T est de 53 km/h. Cela signifie que la capacité pratique de la voie en rampe est la suivante :

$$CP_{vr} = (10 * 53 + 1\ 200) / 3,0 = 577 \text{ poids lourds par heure}$$

### 3.2.4 Répartition du trafic entre sens de circulation

Lorsque la capacité de chaque sens de circulation du tunnel a été déterminée séparément, les deux valeurs sont additionnées pour calculer la capacité totale du tunnel. Si à un moment donné ou à l'avenir, la demande de trafic est telle que les deux sens de circulation sont saturés simultanément, la capacité totale est alors, tout simplement, la somme des capacités des deux sens de circulation.

Néanmoins, dans la plupart des cas, lorsque la demande est faible dans un sens de circulation, la demande dans l'autre sens est maximale. Si telle est la situation prédominante, la capacité conjointe du tunnel sera la somme de la capacité maximale dans un sens de circulation et de la demande dans l'autre sens au même moment, pourvu que cette valeur soit inférieure à la capacité calculée. Le tunnel pourrait supporter une densité de trafic supérieure dans un sens de circulation, mais si la demande ne peut pas être satisfaite, le tunnel sera saturé (au moins dans un sens) avec une densité totale qui sera la somme des deux sens et sera inférieure à la capacité pratique calculée.

### 3.2.5 Capacité journalière

Il est également courant d'exprimer la capacité pratique en véhicules par jour plutôt que par heure. Le rapport entre le TMJA maximal et la capacité dépend du type de trafic et de l'environnement du tunnel. Le TMJA est environ 11 fois supérieur sur les routes urbaines ou interurbaines saturées, et 6 fois supérieur sur les routes rurales supportant un trafic de vacanciers.

$E_T$  is the equivalent in heavy vehicles or trucks, as calculated from the above table in the column corresponding to 20% or more heavy vehicles. If the total flow of traffic does not include sufficient trucks and heavy vehicles to saturate the climbing-lane, not all the capacity is used, as some passenger cars will travel between the trucks in traffic lanes specialised for slow vehicles, but very rarely is the remaining capacity efficiently used to full advantage.

As an example, a climbing-lane of 3000 m in length with a gradient of 3% results in an  $E_T$  of 3.0, whereas the balanced speed  $V_{HGV}$  for trucks with a power of 8 kW/Tn is 53 km/h. This means that the practical capacity of the climbing lane is:

$$PCcl = (10 * 53 + 1200) / 3.0 = 577 \text{ heavy goods vehicles per hour.}$$

### 3.2.4 Distribution of traffic between directions of travel

When the capacity of each of the directions of travel in the tunnel has been determined separately, both values are then added together to determine the total capacity of the tunnel. If currently, or in the future, there may be sufficient traffic demand to saturate both directions simultaneously, the total capacity is, simply, the sum of the capacity of both directions.

However, the most usual situation is that whenever there is low demand in one direction, the demand on the other is usually maximum. If this is the predominant effect, the joint capacity of the tunnel will be the sum of the maximum capacity of one direction, plus the demand in the other direction at the same times, provided this value is less than the calculated capacity. The tunnel could effectively support greater traffic intensity in one of the two directions, but if the demand cannot be met the tunnel will be saturated (at least in one of the directions) with a total intensity which is the sum of both directions and less than the calculated practical capacity.

### 3.2.5 Daily Capacity

It is also quite common to express the practical capacity in vehicles per day instead of vehicles per hour. The relationship between maximum AADT and capacity depends on the type of traffic and the environment of the tunnel, the AADT being in the order of 11 times higher in saturated urban or metropolitan roads, and 6 times higher on rural roads with vacational traffic.