

CETU

dossier pilote des tunnels

Novembre 2000

4.2 éclairage

dossier pilote des tunnels équipement

section 4.2 éclairage

Novembre 2000

CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS
25, AVENUE FRANÇOIS MITTERRAND - CASE N°1 - 69674 BRON CEDEX - FRANCE
TEL : 04 72 14 34 00 - TELECOPIE : 04 72 14 34 30 - E-mail : cetu@equipement.gouv.fr

I.S.B.N. 2-11-084741-7

■ **Le dossier pilote des tunnels est composé de six documents :**

- 1 - Présentation - Synthèse (à paraître)
- 2 - Géométrie (Décembre 1990)
- 3 - Génie civil (Novembre 1998)
- 4 - Equipements
- 5 - Environnement (Décembre 1990)
- 6 - Coûts (à paraître)

■ **Le document Equipements auquel appartient le présent fascicule est composé des sections suivantes :**

- 4.1 - Ventilation (à paraître)
- 4.2 - Eclairage
- 4.3 - Alimentation électrique (Septembre 1994)
- 4.4 - Equipements d'exploitation et de sécurité (Septembre 1994)
- 4.5 - Exploitation (Septembre 1994)



Responsable de production : Jean-Claude Martin - CETU
Conception • Edition : SPECIFIQUE J.L.P. - Lyon
Téléphone : 04 37 91 69 50 - E-mail : specifique2@wanadoo.fr
Maquette : Françoise CHARNAY

SOMMAIRE

Chapitre 1	Principes de l'éclairage des tunnels	7
1.1	Rôle de l'éclairage	8
1.1.1	Phénomènes perturbant la vision à l'entrée d'un tunnel	8
1.1.2	Objectifs de l'éclairage	8
1.1.3	Zones d'éclairage	9
1.2	Classification des tunnels pour l'éclairage	10
1.3	Cas où l'éclairage n'est pas obligatoire	10
1.4	Eclairage de sécurité	11
1.5	L'installation d'éclairage	11
1.5.1	Flux lumineux, luminance et éclairement	11
1.5.2	Types d'installations	12
1.5.3	Fonctionnement de l'installation	12
1.6	Amélioration de la visibilité et du guidage	12
1.6.1	A l'extérieur	12
1.6.2	A l'intérieur	13-14
Chapitre 2	Eclairage des tunnels longs	15
2.1	Section courante	15
2.1.1	Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite	16
2.1.2	Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse élevée	16
2.1.3	Tunnels urbains	16
2.1.4	Tunnels très longs	16
2.1.5	Eclairages réduits de nuit	16
2.2	Zones d'entrée	16
2.2.1	Principe de dimensionnement	17
2.2.2	Facteurs influant sur le dimensionnement	17
2.2.3	Ordres de grandeur	18-21
2.3	Zones de sortie	22
2.4	Pertes d'efficacité de l'installation	22
Chapitre 3	Eclairage des tunnels courts	23
3.1	Définition	23
3.2	Tunnels urbains	23-24
3.3	Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse importante	25
3.3.1	Tunnels bidirectionnels	25
3.3.2	Tunnels unidirectionnels	26
3.4	Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite	27
3.5	Commentaires d'emploi	27
3.6	Guidage	28
3.7	Eclairage nocturne	28
Chapitre 4	Influence de la chaussée	29
4.1	Rôle photométrique du revêtement de chaussée	29
4.2	Caractérisation photométrique des revêtements de chaussée	29
4.2.1	Facteur de réflexion diffuse, coefficient de clarté et rapport R	29-30
4.2.2	La classification de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.)	30
4.2.3	Types de chaussée	31

4.3	Influence du revêtement sur les besoins en éclairage.....	31
4.3.1	Système symétrique.....	32
4.3.2	Système à contre-flux.....	32-33
4.3.3	Conclusions sur l'influence du revêtement.....	34
4.4	Choix du revêtement de chaussée.....	34-35
Chapitre 5	Conception de l'installation.....	37
5.1	Conditions générales.....	37
5.2	Types d'installations.....	37
5.2.1	Appareils étanches à flux dirigé de type classique.....	37
5.2.2	Galerie spéciale d'éclairage.....	38
5.2.3	Système à contre-flux.....	38-39
5.3	Implantation des appareils.....	39
5.3.1	Luminaires à flux dirigé de type symétrique.....	39-43
5.3.2	Système à contre-flux.....	43
5.4	Qualités requises de l'installation.....	44
5.4.1	Mode de prescription et de contrôle des performances photométriques des installations.....	44
5.4.2	Performances.....	44-47
5.5	Sources lumineuses.....	47
5.5.1	Qualités demandées.....	47
5.5.2	Choix des sources.....	47-49
5.6	Luminaires.....	50
5.6.1	Rappel des contraintes liées à l'utilisation.....	50
5.6.2	Constitution des luminaires.....	50-51
5.7	Conduite du projet.....	51
5.7.1	- Choix de base - Conception générale.....	51
5.7.2	- Projet détaillé.....	51-54
Chapitre 6	Alimentation électrique et commande.....	55
6.1	Distribution électrique.....	55
6.1.1	Principes.....	55
6.1.2	Alimentation secourue sans coupure.....	55
6.1.3	Alimentation secourue de puissance.....	55
6.2	Eclairage de sécurité et jalonnement lumineux.....	56
6.3	Dimensionnement de l'alimentation électrique.....	56
6.4	Dispositifs de commande.....	57
Chapitre 7	Eclairage naturel.....	59
7.1	Généralités.....	59
7.2	Ouvertures.....	59
7.2.1	Ouvertures latérales.....	59
7.2.2	Cas d'une succession de tunnels courts.....	59-60
7.2.3	Cas particuliers des butons.....	60
7.3	Systèmes à transmission.....	60
7.3.1	Paralumes.....	60
7.3.2	Couvertures translucides (cas des tranchées couvertes).....	61
Bibliographie	63-64
Illustrations photographiques	65-66
Glossaire	67-69

Principes de l'éclairage des tunnels

Une particularité fondamentale des tunnels est le besoin d'un éclairage de jour. En effet, dans la plupart de ces ouvrages, la lumière naturelle ne pénètre que sur une distance de l'ordre d'une à trois fois leur plus grande dimension transversale, en fonction de l'orientation et du site. Au-delà, les conditions lumineuses sont insuffisantes pour assurer la visibilité d'obstacles éventuels, ou même le guidage des usagers. L'éclairage propre des véhicules ne permet absolument pas de satisfaire le jour aux besoins de vision à l'entrée des tunnels.

C'est pourquoi il est indispensable d'installer un éclairage artificiel diurne qui offre aux usagers des conditions de visibilité et de confort qui ne s'écartent pas trop de celles qu'ils rencontrent à l'air libre.

De nuit l'éclairage artificiel est conservé à un niveau réduit de manière à souligner le point singulier qu'est le tunnel et à assurer de bonnes conditions de visibilité.

Il est très difficile de corrélérer l'éclairage et les accidents mais il est indéniable que l'éclairage joue un rôle essentiel dans les tunnels routiers pour assurer, en premier lieu, la sécurité, mais aussi le confort des utilisateurs. C'est par ailleurs un équipement coûteux :

- d'une part à l'investissement,
- mais surtout en exploitation, où il représente une part souvent prépondérante, et en tout cas non négligeable, des dépenses de fonctionnement et d'entretien.

C'est pourquoi il convient de porter une grande attention à sa conception, en visant la meilleure adaptation aux besoins des automobilistes tout en limitant les coûts, notamment d'exploitation.

Le présent document tient compte des dispositions concernant l'éclairage qui figurent dans la Circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, et plus précisément dans l'instruction technique qui lui est jointe en annexe 2.



▲ *Photo n° 1 - Tunnel de la Vierge sur la RN 9 à Lodève (renforcement éteint)*

1.1 - Rôle de l'éclairage

1.1.1 - Phénomènes perturbant la vision à l'entrée d'un tunnel

De jour, deux phénomènes se conjuguent à l'entrée d'un ouvrage souterrain pour réduire fortement la perception visuelle des conducteurs.

◆ **Le défaut d'adaptation spatiale :**

A l'approche d'un tunnel, l'œil ne parvient pas à distinguer des obstacles éventuels à l'intérieur de celui-ci, car les niveaux lumineux y sont faibles, et il est ébloui par l'environnement de l'entrée, comparativement très lumineux. Le tunnel apparaît comme un "trou noir" au centre d'un champ de vision globalement clair, constitué par les ouvrages de tête, la chaussée à l'air libre, le site qui l'entoure, voire même en partie le ciel.

◆ **Le défaut d'adaptation temporelle :**

En entrant dans l'ouvrage, l'automobiliste passe soudain d'un niveau d'éclairage très élevé à un niveau beaucoup plus faible. Ce phénomène est plus ou moins rapide suivant la vitesse du véhicule, mais dans tous les cas l'œil ne peut s'adapter instantanément pour assurer une vision correcte à de faibles niveaux lumineux.

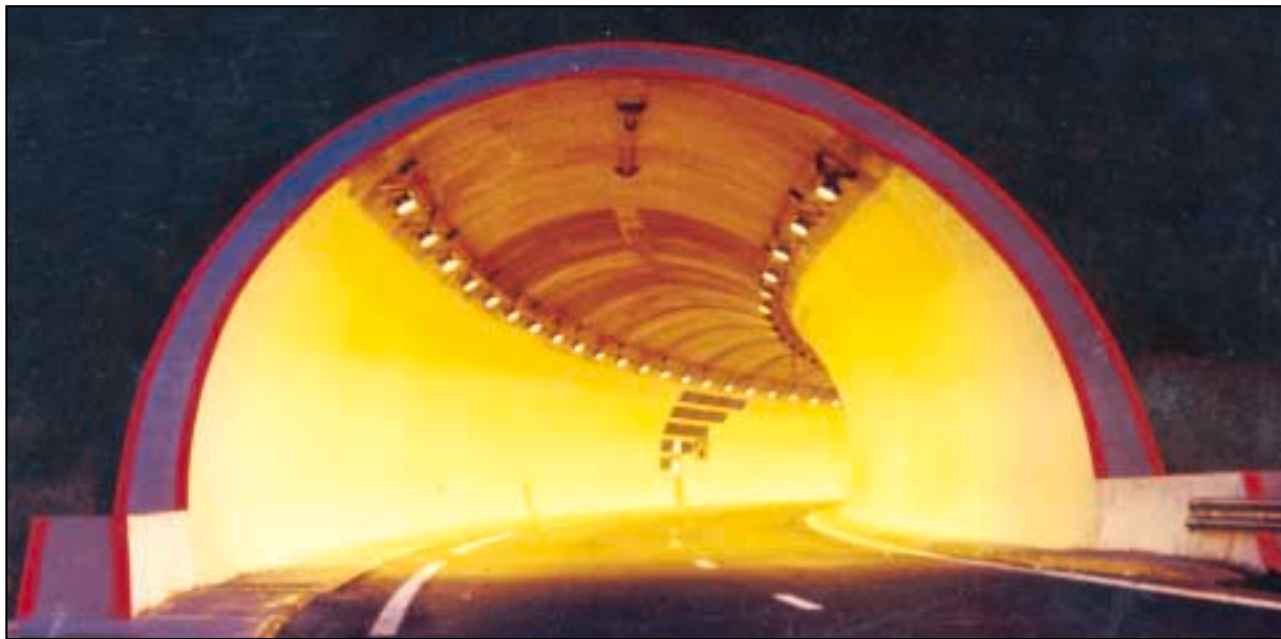
1.1.2 - Objectifs de l'éclairage

Pour des raisons de coût, il n'est pas possible de rétablir en tunnel des conditions d'éclairage identiques à celles qui règnent de jour à l'extérieur, et qui peuvent atteindre jusqu'à 100 000 lux.

Dans les premières centaines de mètres du tunnel, l'installation d'éclairage diurne est dimensionnée pour assurer une vision suffisante d'éventuels obstacles sur la chaussée, en palliant les défauts d'adaptation spatiale et temporelle. Après une première réduction au passage de l'entrée, qui est brusque mais conçue pour rester acceptable pour la visibilité, les niveaux d'éclairage décroissent progressivement, jusqu'à atteindre les niveaux nettement plus faibles de la section courante.

L'installation est conçue pour permettre à un automobiliste, tout au long de son déplacement, de distinguer un obstacle gisant sur la chaussée, suffisamment loin devant lui pour pouvoir s'arrêter en toute sécurité. La distance de visibilité prise en compte dans les calculs est égale à la distance d'arrêt sur route mouillée correspondant à la vitesse retenue pour le projet.

Les niveaux de section courante sont choisis en fonction de considérations de sécurité, mais aussi le plus souvent de confort. Ils n'assurent que quelques millièmes du niveau extérieur maximal et sont du même ordre de grandeur que ce qu'offre un éclairage public nocturne.



▲ **Photo n° 2 - Tunnel de la Grand-Mare à Rouen (éclairage de renforcement d'entrée allumé pour les besoins de la photo)**

Les valeurs précisées dans le présent dossier pilote sont différentes des recommandations de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.). Celle-ci est en effet plus attentive à des notions de confort, ce qui conduit la plupart du temps à des niveaux plus élevés. Dans certains cas toutefois (éclairage de type symétrique), les valeurs recommandées ici sont supérieures à celle de la C.I.E. qui ne prend qu'imparfaitement en compte l'effet des vitesses élevées.

Notons toutefois que l'œil se réadapte beaucoup plus vite lorsqu'il passe d'un environnement sombre à une situation plus claire. Dans les tubes bidirectionnels, l'éclairage de renforcement d'entrée d'un sens de circulation joue le rôle de renforcement de sortie pour l'autre sens.

1.1.3 Zones d'éclairage

Il apparaît ainsi en tunnel deux zones successives :

- la zone dite d'entrée où les niveaux d'éclairage sont renforcés et décroissent progressivement vers l'intérieur de l'ouvrage,
- la zone de section courante qui correspond au reste du tunnel : le niveau y est constant et beaucoup plus faible, mais assure cependant la visibilité nécessaire au conducteur dont l'œil s'est adapté.

Dans certains cas particuliers de tubes unidirectionnels où existent de sérieux risques de gêne et d'éblouissement à la sortie, on prévoit de jour une troisième zone : la zone de renforcement de sortie destinée à faciliter l'adaptation de l'utilisateur aux conditions lumineuses extérieures.



▲ **Photo n° 3 - Tunnel de Nogent sur A86 dans le Val de Marne (section courante)**



▲ **Photo n° 4 - Tunnel de Cornil (RN 89 - Corrèze)**
L'éclairage de renforcement d'entrée d'un sens joue le rôle de renforcement de sortie pour l'autre sens

1.2 - Classification des tunnels pour l'éclairage

Pour les besoins du projet d'éclairage, il est utile de distinguer deux catégories d'ouvrages :

- les tunnels "longs" qui comportent à la fois une zone d'entrée et une zone de section courante,
- les tunnels "courts" où il n'existe pas de section courante, voire pas d'éclairage diurne du tout.

Les appellations "court" et "long" s'entendent ici du seul point de vue de l'éclairage.

Le chapitre 2 est consacré aux tunnels longs et décrit le dimensionnement des zones d'entrée et de section courante.

Le chapitre 3 s'intéresse aux tunnels courts. Il expose les cas dans lesquels on peut se passer d'éclairage diurne et ceux dans lesquels il peut être réduit. Il convient de s'y reporter pour des longueurs inférieures à :

- 125 m pour un tunnel urbain,
- 150 m pour un tunnel interurbain bidirectionnel à fort trafic (supérieur à 2 000 véhicules par jour et par sens en moyenne annuelle) ou à vitesse importante (supérieure à 70 km/h),
- 200 m pour les autres types de tunnels.

1.3 - Cas où l'éclairage n'est pas obligatoire

Indépendamment du cas des tunnels courts, qui fait l'objet du chapitre 3, il est possible de se dispenser d'éclairage, quelle que soit la longueur, dans certains tunnels à faible trafic (trafic prévisible de chaque sens, dix ans après la mise en service, inférieur à la fois à 2 000 véhicules par jour en moyenne annuelle et à 400 véhicules à l'heure de pointe, 30^{ème} heure la plus chargée de l'année ; pour l'appréciation de ces critères, les poids lourds sont comptés pour cinq véhicules).

Il faut pour cela :

- que les risques d'accident soient très limités et ne soient pas sensiblement aggravés par l'absence d'éclairage,
- que le coût de l'éclairage soit excessif, en investissement et en fonctionnement, par rapport à la sécurité et au confort qu'il apporterait.

Si la décision est prise de ne pas réaliser d'éclairage, et si la longueur du tunnel dépasse celle à partir de laquelle le chapitre 3 recommande un éclairage de jour, une signalisation adéquate doit être implantée à chaque entrée du tunnel afin d'avertir les conducteurs de l'absence d'éclairage dans le tunnel, de demander l'éclairage des véhicules (type nuit) et d'imposer une vitesse adaptée au contexte des accès et du tunnel, laquelle n'excédera en principe pas 50 km/h. Un balisage lumineux devra en outre être réalisé en partie basse des piédroits comme indiqué au § 1.4 ci-après.

1.4 - Eclairage de sécurité

Pour permettre aux usagers d'évacuer le tunnel en cas de panne de l'alimentation électrique, il doit être prévu un éclairage de sécurité assurant un niveau minimal d'éclairage sur la chaussée et les trottoirs (voir § 5.7.2.4.).

Les circuits qui permettent d'assurer cet éclairage doivent être alimentés par une source d'énergie secourue et doivent répondre à des exigences particulières en matière de résistance au feu (voir § 6.2). Le respect de ces dispositions permet à l'éclairage de sécurité d'assurer une autre fonction : permettre aux usagers d'évacuer le tunnel et faciliter l'intervention des secours en cas d'incendie ou d'accident grave.

Cet éclairage est obligatoire dans tous les tunnels dont la longueur dépasse 300 mètres sauf s'ils sont à faible trafic (voir § 1.3).

Pour faciliter l'évacuation, notamment dans le cas où les fumées d'un incendie masqueraient l'éclairage placé en hauteur (éclairage normal ou de sécurité), la mise en place d'un jalonnement lumineux est obligatoire dans tous les tunnels de longueur supérieure à 300 mètres (voir § 6.2) ; à cet effet des plots de balisage lumineux (ou hublots de jalonnement) doivent être placés à 1 mètre de hauteur environ sur chaque piédroit tous les 10 mètres environ.

1.5 - L'installation d'éclairage

Le présent paragraphe donne quelques éléments de base pour la bonne compréhension des chapitres suivants qui sont consacrés à la conception de l'installation d'éclairage.

Les niveaux d'éclairage ne déterminent pas seuls les conditions de visibilité et de guidage en tunnel : le paragraphe 1.6 indique différents éléments complémentaires à prendre en compte tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'ouvrage.

1.5.1 - Flux lumineux, luminance et éclairage

Il n'est pas question de faire ici un cours d'éclairagisme : nombreux sont les documents auxquels le lecteur peut se reporter à ce sujet (cf. bibliographie, non exhaustive).

Rappelons seulement que le **flux énergétique** représente la puissance émise, transmise ou reçue sous forme de rayonnement ; il s'exprime en watts (W). Le **flux lumineux** est la grandeur dérivée du flux énergétique par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur un observateur dont la sensibilité spectrale est définie par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) : il s'exprime en lumens (lm).

L'œil est sensible à la **luminance** des objets, laquelle s'exprime en candelas par mètre carré (cd/m²). Elle traduit la "luminosité" d'une petite surface regardée dans une direction donnée et dépend à la fois des conditions d'éclairage de cette surface, de ses caractéristiques propres de réflexion et du point d'observation. Le dimensionnement des niveaux d'éclairage en tunnel s'effectue d'abord en luminances : c'est l'unité de base des chapitres 2 et 3 qui sont consacrés au dimensionnement de l'éclairage des tunnels longs et des tunnels courts.

En revanche une installation d'éclairage se caractérise par les niveaux d'**éclairage** qu'elle produit. Exprimé en lux (lx), l'éclairage en un point est le quotient du flux lumineux reçu sur un élément de surface par l'aire de cet élément. Le chapitre 5, qui traite de la conception de l'installation d'éclairage, raisonne principalement en termes d'éclairage.

Pour passer de la luminance à l'éclairage, il faut connaître les caractéristiques photométriques de la surface éclairée, et celles-ci ont donc une grande importance pour la conception de l'installation : c'est pourquoi le chapitre 4 est consacré au rôle de la chaussée.

Dans de nombreux cas, les calculs font l'hypothèse que la chaussée est parfaitement diffusante (ou orthotrope), c'est-à-dire que la luminance d'un petit élément de chaussée est la même quelle que soit la direction sous laquelle on le regarde. Ceci permet de disposer d'une relation simple, dite loi de Lambert, entre luminance et éclairage. Celle-ci ne dépend que d'un coefficient de réflexion, mais n'est pas applicable aux revêtements qui ont un caractère spéculaire, c'est à dire qui renvoient préférentiellement la lumière dans certaines directions.

1.5.2 - Types d'installations

Les tunnels sont le plus souvent équipés de luminaires à flux dirigé, qui projettent la lumière émise par les sources vers la chaussée et la base des piédroits. Trois types d'installations existent mais deux seulement sont utilisés en pratique.

Dans le **système classique**, dit **symétrique**, le flux des appareils est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel : ils envoient autant de lumière en direction de chaque extrémité de l'ouvrage. Les obstacles sont vus en contraste négatif, c'est à dire qu'ils se profilent en sombre sur le fond plus clair de la chaussée. Le système est utilisé dans tous les cas en section courante. En zone d'entrée il convient plutôt aux tunnels dont la vitesse d'approche est faible.

Le **système à contre-flux**, dit aussi à **mobilisation de contraste**, est basé sur des appareils qui projettent la lumière en direction des automobilistes, dans des conditions qui évitent de les éblouir. Il accentue ainsi la vision des obstacles en contraste négatif. Ce système n'est adapté qu'aux zones d'entrée, mais il y présente des avantages économiques sérieux en investissement et surtout en exploitation dès que la vitesse d'approche est relativement élevée (au-delà de 70 km/h). En section courante ce type d'installation est généralement moins économique qu'un système classique. En effet le respect des uniformités longitudinales et transversales impose de mettre en place presque autant de luminaires qu'en système classique, alors que le coût unitaire d'un appareil à contre-flux est sensiblement plus élevé que celui d'un appareil classique.

Un troisième type d'installation existe mais n'est pas à ce jour utilisé en France, pour des raisons d'économie. Il s'agit du système à flux dirigé dans le sens de circulation. Les obstacles sont vus en contraste positif, se profilant en clair sur le fond plus sombre de la chaussée. Quoique tentant pour ce qui est du confort, ce système conduit à des surcoûts à l'investissement et en exploitation.

1.5.3 - Fonctionnement de l'installation

L'installation d'éclairage doit être accompagnée d'une alimentation électrique et d'un système de commande adéquats : c'est l'objet du chapitre 6 qui insiste fortement sur ce dernier aspect. En effet la tenue des objectifs de sécurité et de confort assignés à l'installation d'éclairage, et simultanément l'optimisation des coûts de fonctionnement, dépendent de la bonne conception et du bon maintien en état de fonctionnement du système de commande.

(^{*})
d i s p o s i t i o n s

1.6 - Amélioration de la visibilité et du guidage

En complément des indications des chapitres précédents, un certain nombre de dispositions peuvent être prises, soit pour permettre une réduction du dimensionnement de l'éclairage, soit pour compléter celui-ci dans le sens d'une meilleure visibilité et d'un meilleur guidage des conducteurs.

1.6.1 - A l'extérieur

Les suréclairages d'entrée constituent en général une part importante du coût de l'éclairage. C'est donc en priorité sur les zones d'entrée que doit porter l'effort d'un dimensionnement bien ajusté des niveaux d'éclairage, sans pour autant descendre au-dessous des limites minimales admissibles.

L'environnement à l'approche des têtes de tunnels ayant une forte influence sur les niveaux de suréclairage, tout doit être mis en œuvre pour abaisser les luminances d'ambiance extérieures :

- ◆ traiter ou masquer à l'aide de végétation et de revêtements sombres les façades de bâtiments, murs de trémie ou de soutènement, frontons , etc.
- ◆ prévoir des lignes d'arbres ou des écrans masquant le plus possible le ciel et les horizons lointains et occultant le soleil lorsque, bas sur l'horizon, il devient éblouissant (ces dispositions présentent d'ailleurs le même intérêt pour les sorties de tunnel),
- ◆ prévoir à l'extérieur une chaussée noire en béton bitumineux, conservant si possible sa couleur sous l'usure du trafic (agrégats sombres) (*).

D'autre part il convient d'éviter dans la mesure du possible les orientations Est-Ouest lorsque la couverture du tunnel est réduite, notamment dans le cas d'une tranchée couverte. Il est en effet impossible de rétablir la visibilité d'un automobiliste qui a le soleil dans les yeux.

C e s

1.6.2 - A l'intérieur

Plusieurs solutions sont possibles à l'intérieur des ouvrages pour améliorer les conditions de guidage et de visibilité, et pour limiter par conséquent les dépenses d'éclairage. Une énumération non exhaustive en est donnée ci-après :

- ◆ L'adoption d'une chaussée claire en tunnel peut permettre une réduction des éclairagements. Le chapitre 4 donne toutes indications sur ce sujet.
- ◆ Le recours à des revêtements de piédroits clairs améliore la visibilité d'obstacles en bordure de chaussée. Il augmente aussi légèrement le niveau d'éclairage sur la chaussée mais cet apport n'est pas pris en compte pour le dimensionnement de l'installation.



▲ **Photo n° 5 -**
Piédroits clairs avec éclairage à contre-flux dans le tunnel des Treize Vents (Autoroute A 55)

Une exécution très soignée des revêtements de piédroits contribue également au confort et à un meilleur guidage.

Pour un éclairage symétrique, les revêtements de piédroits sont de préférence diffusants. Dans le cas du contre-flux, des revêtements moins clairs, mais plus spéculaires, sont préférables.

- ◆ Un bon guidage de l'automobiliste contribue dans tous les cas, sinon à l'amélioration de la visibilité, du moins à la sécurité. Ce guidage peut être obtenu - et maintenu en cours d'exploitation - grâce à des plots réfléchissants, diodes électroluminescentes, bandes peintes, etc. Lorsque, pour des raisons de sécurité, il est prévu des hublots de jalonnement, ceux-ci jouent également un rôle de guidage non négligeable.
- ◆ Une diminution très appréciable de l'éblouissement dû à la vision de la sortie peut être obtenue, lorsque c'est possible, en affectant le tracé en plan du tunnel d'une courbure légère à proximité de l'extrémité (rayon de préférence sensiblement supérieur au minimum autorisé sur l'itinéraire). Cette solution est évidem-

ment à éviter pour les tunnels courts où la vision de la sortie est un facteur de meilleure visibilité. Dans les autres cas, elle permet aussi d'éviter que l'œil ne soit attiré par la vision directe de la sortie, vision qui limiterait la perception d'obstacles éventuels et pourrait conduire le conducteur à augmenter inconsciemment sa vitesse.

- ◆ Dans les tunnels pour lesquels certaines contraintes ont conduit à prévoir des courbes très prononcées, on doit chercher, principalement lorsque l'ouvrage est court, non seulement à améliorer l'ambiance générale, mais surtout à réaliser un guidage très accentué qui s'impose à l'usager. En plus d'une luminance élevée de la paroi concave, les sources peuvent procurer un balisage très précis permettant d'apprécier la courbure du tracé avant l'entrée, puis dans le souterrain. Le projecteur doit alors prendre les précautions nécessaires afin d'éviter tout éblouissement dû à la vision directe de sources lumineuses non masquées.
- ◆ Afin de signaler à l'attention des automobilistes des points singuliers comme niches de sécurité, garages, galeries de retournement, issues de secours, il est possible de modifier localement le mode d'éclairage de la section courante (emploi de type de sources différentes, modification du pas, etc.).
- ◆ Dans le cas d'urbanisme souterrain complexe, ou lorsque les contraintes de tracé font qu'il existe des échanges à l'intérieur des tunnels (bretelles d'insertion ou de sortie), on veille à adopter des solutions d'éclairage mettant en évidence ces zones singulières.

Les recommandations précédentes sont valables pour tous les ouvrages. Une attention particulière doit être accordée aux tunnels dont le profil en long accuse une rupture, à pentes et contre-pentes successives. En particulier, certains tunnels présentant un dos d'âne accentué conduisent l'usager à découvrir d'un seul coup la sortie de l'ouvrage qui apparaît comme une zone très claire. Dans ce cas, on peut envisager d'installer dès ce point un renforcement d'éclairage de sortie.



▲ *Photo n° 6 - Eclairage d'un garage dans le tunnel Maurice Lemaire (Sainte Marie aux Mines - RN 159 - Vosges)*



▲ *Photo n° 7 - Bretelle de sortie dans le tunnel de Rochecardon (Boulevard Périphérique Nord de Lyon)*

Eclairage des tunnels longs

2.1 - Section courante

La section courante est la zone où il peut n'être réalisé qu'un éclairage minimal, car en raison de la distance depuis l'entrée, l'œil du conducteur s'est adapté à des luminances beaucoup plus faibles qu'à l'air libre. Son niveau de luminance doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- ◆ visibilité (en attention diffuse) de tout obstacle éventuel sur la chaussée à une distance au moins

égale à la distance d'arrêt des véhicules, en tenant compte de l'opacité de l'atmosphère du tunnel (fumées émises par le trafic),

- ◆ guidage sans ambiguïté des véhicules,
- ◆ bonne qualité de l'ambiance lumineuse, dont l'effet psychologique est important, surtout pour les tunnels très longs.

On notera que les niveaux de section courante sont réalisés sur toute la longueur de l'ouvrage, même dans les zones de renforcement, où ils prennent le nom d'éclairage de base.



▲ Photo n° 8 - Tunnel de la Grand-Mare sur la RN 28 à Rouen (section courante)

2.1.1 - Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite

Le présent paragraphe concerne les tunnels à faible trafic (voir § 1.3) et où la vitesse autorisée n'excède pas 70 km/h.

Dans ces conditions, il n'est en général pas introduit de critère particulier de confort pour la détermination du niveau des luminances.

Un niveau de luminance de la chaussée de l'ordre de 2 cd/m² est une valeur correcte pour la visibilité et le confort de l'automobiliste, et ce niveau peut être atteint dans des conditions économiques acceptables.

Si le tunnel est utilisé par d'assez nombreux poids lourds, il convient de veiller à une bonne transparence de l'atmosphère par une ventilation appropriée.

2.1.2 - Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse élevée

Dans les tunnels qui reçoivent plus de 2 000 véhicules/jour par sens ou dont la vitesse autorisée dépasse 70 km/h, il est souhaitable de prévoir un niveau de luminance plus élevé que dans le cas précédent :

- 4 à 5 cd/m² sur autoroute, ou sur voie de caractéristiques comparables,
- 3 à 4 cd/m² dans les autres cas.

2.1.3 - Tunnels urbains

Dans les tunnels urbains, qui supportent en général des trafics importants, il est admis un niveau de 4 à 6 cd/m², voire même plus, selon le niveau de service de l'itinéraire.

2.1.4 - Tunnels très longs

Dans les tunnels qui demandent plus de 30 secondes pour être parcourus à la vitesse autorisée (par exemple longueur supérieure à 750 m pour une vitesse de 90 km/h), l'œil a parfaitement le temps de s'adapter : à partir d'une distance de l'entrée correspondant à environ 30 secondes de parcours, il peut être admis des réductions dans les niveaux de section courante jusqu'à la limite inférieure de 2 cd/m².

Notons que dans tous les cas, au bout de 20 secondes de parcours en souterrain, la méthode de dimensionnement ne demande pas plus de 2 cd/m² pour assurer la vision d'obstacles éventuels, quelles que soient les conditions d'entrée en tunnel et la vitesse autorisée (pour plus de précision, voir le tableau du § 2.2.3 ci-après).

2.1.5 - Eclairages réduits de nuit

La nuit, pour des trafics peu élevés, et même en dehors de toute considération d'économie, il est indispensable de réduire les niveaux d'éclairage à une valeur faible pour éviter une perte de visibilité à la sortie généralement peu ou pas éclairée. Des niveaux de 1 à 2 cd/m² (comparables aux niveaux installés à l'air libre) sont alors suffisants, la limite inférieure devant s'appliquer pour les ouvrages dont les routes d'accès ne sont pas éclairées. Rappelons que même dans ce dernier cas, il est nécessaire de conserver de nuit un éclairage artificiel de manière à souligner le point singulier qu'est le tunnel (sauf bien sûr dans les tunnels qui ne disposent pas d'installation d'éclairage en application du paragraphe 1.3 ci-avant).

2.2 - Zones d'entrée

Ainsi que cela a été expliqué dans le chapitre 1, l'éclairage de la zone d'entrée des tunnels doit être traité de façon particulière, afin d'assurer une visibilité des obstacles éventuels compatible avec la sécurité des usagers.

Un document technique du CETU, intitulé "Méthode de dimensionnement de l'éclairage d'entrée des tunnels routiers", décrit de façon détaillée les hypothèses et la conduite des calculs. Le lecteur peut utilement s'y reporter.

C'est pourquoi la suite du présent chapitre se limite à décrire sommairement cette méthode, puis examine les facteurs influençant les niveaux requis, avant d'indiquer des valeurs correspondant à des situations types.



▲ **Photo n° 9 -**
Entrée du tunnel de Fourvière (Lyon)

2.2.1 - Principe de dimensionnement

Compte tenu des phénomènes d'adaptation spatiale et temporelle auxquels sont soumis de jour les automobilistes à l'entrée d'un tunnel (cf. chapitre 1), le principe de la méthode développée au CETU consiste à calculer les niveaux de luminance dans la zone d'entrée de façon à assurer la vision d'un obstacle type situé sur la chaussée en avant du conducteur à une distance égale à la distance d'arrêt du véhicule.

L'obstacle type est constitué par une cible verticale carrée de 25 cm de côté dont la face verticale orientée vers l'usager est parfaitement diffusante et dont le coefficient de réflexion peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 0,3. La détection de l'obstacle type est possible quand le contraste existant entre l'obstacle et la chaussée proche est suffisamment important. Ce contraste minimal dépend du type d'installation, des propriétés photométriques de la chaussée et des niveaux d'éclairage fournis par l'installation.

Compte tenu des caractéristiques des installations d'éclairage en tunnel, cette cible se détache en sombre sur le fond plus clair de la chaussée (contraste négatif). La vision de celle-ci implique que les obstacles réels de taille au moins équivalente seront également vus, car ils sont dans leur grande majorité plus sombres (coefficient de réflexion inférieur à 0,3).

Pour un obstacle donné, un éclairage à contre-flux produira, à niveau d'éclairage identique, un contraste de luminance avec la chaussée plus élevé (en valeur absolue) qu'un système symétrique. Ceci conduit pour le système à contre-flux à des éclairages requis plus faibles dans la zone d'entrée pour les mêmes conditions d'approche.

2.2.2 - Facteurs influant sur le dimensionnement

La méthode de dimensionnement dont le principe a été décrit ci-dessus, exploite les résultats de recherches menées in situ et en laboratoire, dont une partie a été réalisée par le CETU.

Ces recherches ont permis de mettre en évidence plusieurs facteurs qui influencent la perception d'obstacles à l'approche d'un tunnel et conditionnent les niveaux à installer dans la zone d'entrée :

- L'environnement de l'entrée de l'ouvrage produit un éblouissement de l'œil, caractérisé par le "voile de Fry", et conduit à des situations d'approche plus ou moins éblouissantes suivant les cas (orientation, présence d'une montagne, fronton clair ou sombre, caractéristiques de la chaussée, vision importante ou non du ciel, etc.). Plus l'environnement est éblouissant plus le "voile de Fry" est élevé.
- Le pare-brise et l'atmosphère créent des "voiles" (ou luminances) parasites et atténuent la transmission de

la lumière, ce qui perturbe la perception d'obstacle à distance (une atmosphère qui perd de sa limpidité amène une augmentation du voile atmosphérique ; de même un pare-brise qui se salit augmente le voile de pare-brise).

- La vitesse des véhicules joue un rôle fondamental puisqu'elle détermine la distance sur laquelle doit être assurée la visibilité, et qu'elle influe dans le phénomène d'adaptation temporelle.
- Le niveau d'éclairage en section courante a une influence seulement sur la longueur de la zone de renforcement.

Alors que le niveau d'éclairage en section courante (cf § 2.1) est fixé au niveau du projet en fonction de la seule nature de l'ouvrage (tunnel urbain ou non, à trafic élevé ou non, à vitesse élevée ou non), il n'en est pas de même des luminances dites de "voile" qui caractérisent les effets de l'environnement du tunnel, du pare-brise et de l'atmosphère : celles-ci sont variables suivant la région, l'orientation, la saison, l'heure de la journée, etc. C'est pourquoi des mesures in situ et/ou des calculs de simulation des caractéristiques lumineuses de l'approche sont systématiquement souhaitables bien que leur réalisation soit souvent délicate.

Pour une première estimation au niveau de l'étude préliminaire, il peut être défini des situations types plus ou moins contraignantes :

◆ Entrée Sud

La situation la plus défavorable (celle pour laquelle les niveaux de luminance de chaussée requis en entrée sont les plus élevés) a lieu en été lorsque l'éclairage de la tête est le plus fort. Les luminances de voile sont fortes si l'environnement est clair, moyennes dans tous les autres cas.

◆ Entrée Nord

Si le tunnel est en site très dégagé, la situation la plus défavorable a lieu au solstice d'hiver, c'est à dire lorsque le soleil est le plus proche de l'axe de vision des usagers ; les luminances de voile sont alors fortes. Dans les sites moins dégagés, les luminances sont moyennes à faibles.

◆ Entrée Est ou Ouest

La situation la plus défavorable pour les sites très dégagés est évidemment celle du soleil rasant. Il faut s'efforcer de l'éviter par un aménagement de l'entrée et prévoir de toute façon des luminances de voiles très fortes pendant une heure avant le coucher du soleil pour l'entrée Est et après le lever du soleil pour l'entrée Ouest. Si le site n'est pas dégagé, les luminances de voile sont moyennes à faibles.

Ces indications sont très schématiques : il faut tenir compte de façon plus précise du caractère plus ou moins clair et réfléchissant de la tête et de son environnement, ainsi que du pourcentage de ciel compris dans le champ de vision du conducteur. Il y a ainsi une différence très nette entre un tunnel creusé surmonté par un relief important qui masque le ciel et une tranchée couverte qui laisse celui-ci largement visible.

2.2.3 - Ordres de grandeur

Obtenu en appliquant la méthode de dimensionnement du CETU à des situations types, le tableau présenté ci-après donne une idée des niveaux de luminance de chaussée requis en entrée (niveau maximal correspondant au premier palier) en fonction de l'importance des voiles parasites décrits au paragraphe précédent, de la vitesse d'approche et du système d'éclairage choisi.

Il indique aussi la longueur totale de la zone de renforcement d'entrée, qui dépend du niveau retenu pour la section courante. Cette longueur est indépendante du système d'éclairage, tout au moins jusqu'à une vitesse de 90 km/h. Au-delà, les valeurs données dans le tableau correspondent au système à contre-flux : un éclairage symétrique, peu réaliste dans ces cas, demanderait des longueurs un peu différentes.

Utilisable tel quel pour l'étude préliminaire, ce tableau ne dispense pas, au niveau du projet d'ouvrage d'art, d'une étude plus détaillée, basée sur des mesures et/ou des simulations des conditions lumineuses de l'approche.

Dans le tableau ci-dessous les valeurs entre parenthèses ne sont presque jamais réalisées en pratique. En système symétrique, des vitesses supérieures à 70 km/h avec voiles forts, 90 km/h avec voiles moyens ou 110 km/h avec voiles faibles conduisent à des niveaux de luminance difficilement réalisables. Il faut alors rechercher d'autres solutions afin de réduire tant les coûts d'investissement que les dépenses d'exploitation :

- traitement des têtes pour réduire le niveau des voiles,
- limitation de vitesse chaque fois que c'est raisonnablement possible.

Pour des vitesses supérieures, il convient de réaliser un éclairage à contre-flux. Toutefois, cette technologie étant de mise au point délicate, le projet devra être conduit avec l'aide d'un service spécialisé.

Même avec un système à contre-flux, les niveaux requis deviennent le plus souvent rédhitoires au-delà de 110 km/h : **il est donc très généralement déconseillé d'autoriser une vitesse supérieure en entrée de tunnel.**

Niveau des voiles	Vitesse d'approche (km/h)	Niveau de luminance en entrée (partie la plus éclairée) avec système :		Longueur du renforcement pour atteindre :		
		symétrique (cd/m ²)	contre-flux (cd/m ²)	8 cd/m ² (m)	5 cd/m ² (m)	2 cd/m ² (m)
Fort	130	-	(440)	600	660	790
	110	(550)	210	360	410	640
	90	(280)	120	300	350	510
	70	150	90	240	290	350
	50	70	-	150	180	270
Moyen	130	-	(290)	550	620	740
	110	(360)	140	300	350	590
	90	180	80	250	300	490
	70	100	60	200	250	350
	50	50	-	120	150	270
Faible	130	-	140	470	530	670
	110	180	70	230	260	420
	90	90	40	170	220	390
	70	50	30	140	180	340
	50	25	-	80	100	220

Les niveaux précédemment indiqués correspondent aux périodes où les conditions photométriques extérieures sont les plus défavorables. Les installations sont conçues pour réaliser également des niveaux plus faibles (deux ou trois régimes le plus souvent) afin de réduire la consommation électrique lorsque l'approche du tunnel est moins éblouissante (voir § 5.7.2.4).

◆ **Commentaires sur l'établissement du tableau précédent**

Le tableau ci-dessus est basé sur trois voiles types qui présentent les valeurs suivantes (en cd/m²) à 100 m avant l'entrée :

Niveau des voiles	Fort	Moyen	Faible
Voile atmosphérique	300	200	100
Voile de pare-brise	200	100	50
Voile de Fry (correspondant à une luminance moyenne $L_{\text{moyen}} =$)	400 (5 400)	300 (4 000)	150 (2 000)

Comme indiqué au paragraphe 2.2.2, la méthode de dimensionnement mise au point par le CETU caractérise l'éblouissement de l'œil du conducteur au moyen du voile de Fry (L_{Fry}) qui tient compte, avec une pondération, de toutes les sources lumineuses présentes dans son champ de vision.

D'autres méthodes, utilisées à l'étranger, sont basées sur une luminance moyenne (L_{moyen}) mesurée dans une partie du champ de vision, souvent dans un cône issu de l'œil et de 20° d'angle au sommet (L_{20°). Une telle luminance moyenne peut fournir une approximation du voile de Fry au moyen de la relation :

$$L_{\text{Fry}} \approx 0,074 L_{\text{moyen}} \text{ (ou } L_{20^\circ}\text{)}$$

Les luminances indiquées entre parenthèses dans le tableau décrivant les voiles types ont été obtenues en inversant cette relation. Toutefois celle-ci n'est exacte que lorsque la luminance est uniforme dans tout le champ de vision du conducteur. Dans les autres cas, l'approximation s'éloignera d'autant plus de la réalité qu'il y aura des sources lumineuses fortes (surface très claire, voire soleil) dans le champ de vision périphérique, tout particulièrement si celles-ci sont situées en dehors de la zone qui sert au calcul de la luminance moyenne (le cône de 20° pour L_{20° par exemple).

Tous détails sur les hypothèses faites et la méthode utilisée peuvent être trouvés dans le document technique CETU cité au début du paragraphe 2.2.

◆ **Exemples de décroissance des luminances dans la zone d'entrée**

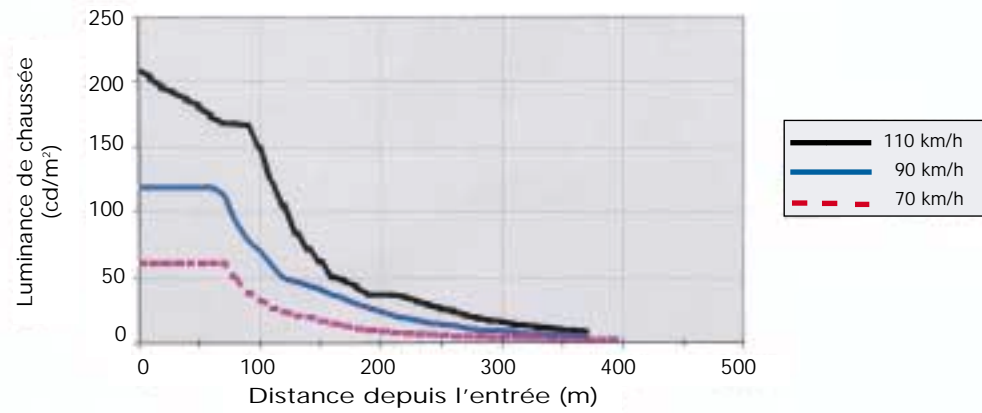
Les niveaux indiqués dans le tableau du début du présent paragraphe correspondent aux luminances de chaussée nécessaires dans la partie la plus éclairée en entrée de tunnel. Au-delà, la luminance peut décroître en fonction de la diminution des besoins liés à l'adaptation spatiale et à l'adaptation temporelle, l'une ou l'autre pouvant s'avérer prépondérante selon les cas.

Le document "Méthode de dimensionnement de l'éclairage d'entrée des tunnels routiers" décrit de façon très précise ces deux phénomènes d'adaptation.

Les six graphiques qui suivent montrent à titre d'illustration la courbe théorique de la luminance requise en fonction de la distance à l'entrée du tunnel pour les cas types figurant dans le tableau.

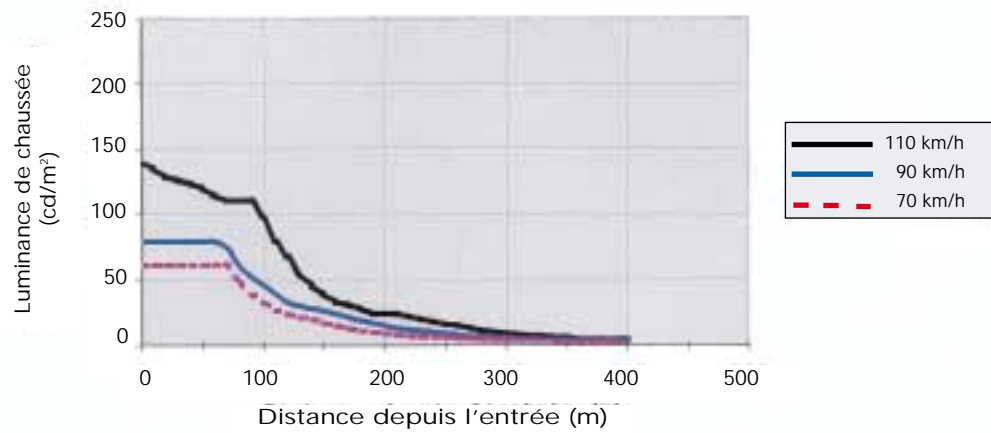
Dans la pratique, la décroissance des niveaux est rarement réalisée de façon continue, mais conduit à mettre en œuvre des paliers successifs, qui doivent se situer au-dessus de la courbe théorique.

Eclairage à contre-flux - Voiles forts



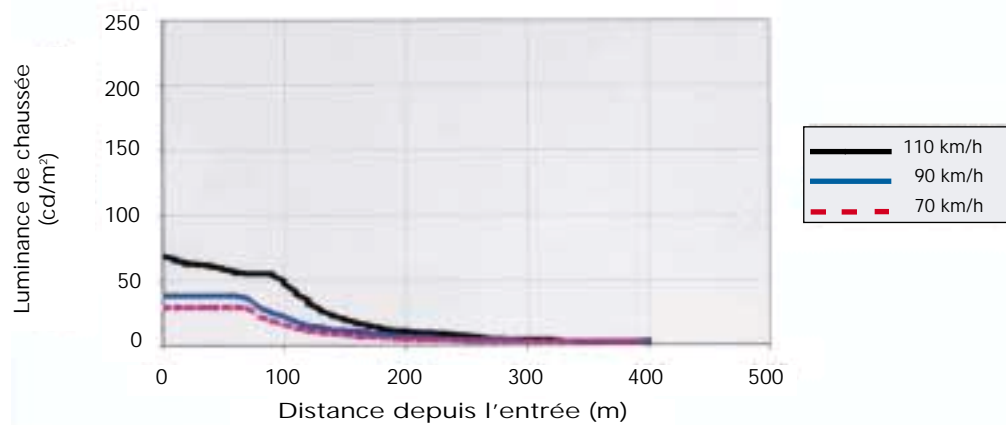
▲ Schéma n°1

Eclairage à contre-flux - Voiles moyens



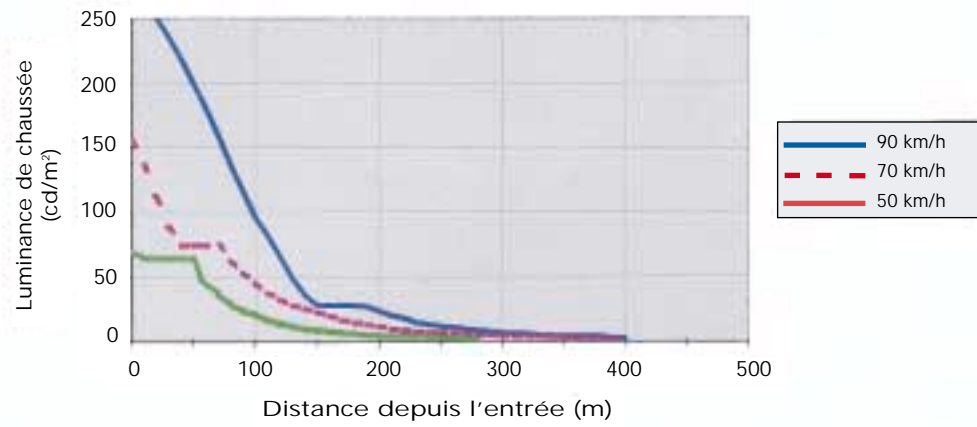
▲ Schéma n°2

Eclairage à contre-flux - Voiles faibles



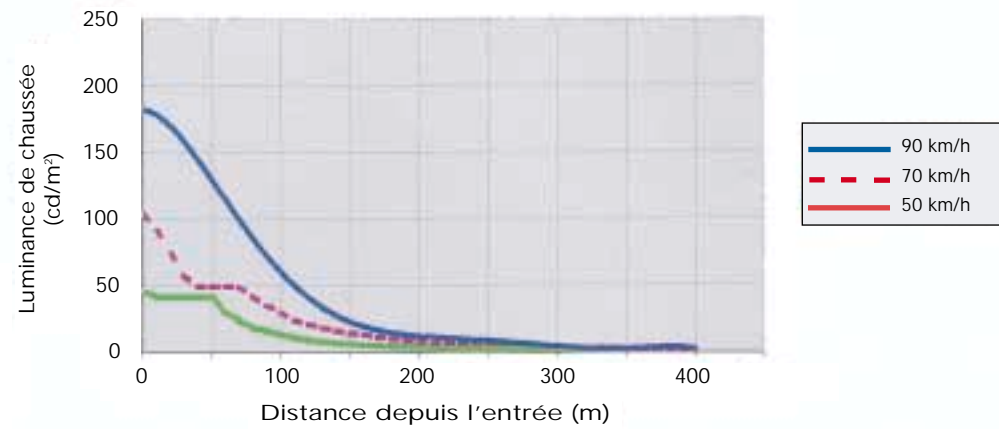
▲ Schéma n°3

Eclairage symétrique - Voiles forts



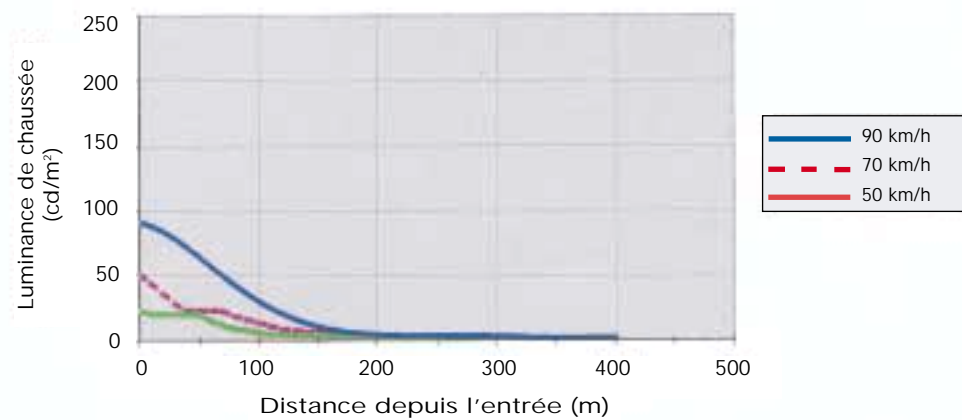
▲ Schéma n°4

Eclairage symétrique - Voiles moyens



▲ Schéma n°5

Eclairage symétrique - Voiles faibles



▲ Schéma n°6



▲ **Photo n° 10 - Tunnel de Bobigny-Drancy sur A86 en Seine Saint-Denis (zone de sortie)**

2.3 - Zones de sortie

L'adaptation pour passer d'une luminance intérieure faible à une luminance d'ambiance extérieure élevée est très rapide et ne pose en général pas de problème de sécurité pour l'utilisateur.

Cependant, dans certains cas particuliers d'ouvrages unidirectionnels, il est souhaitable d'installer un renforcement de sortie. Ceci se produit lorsqu'en fonction de l'orientation de celle-ci, il existe un éblouissement très gênant (dû par exemple au lever ou au coucher du soleil, ou à une vue directe sur la mer, etc.). Dans ces cas, il est souvent souhaitable de prévoir à la sortie un renforcement de l'éclairage sur 50 à 100 m environ, suivant la vitesse des usagers. A titre de premier dégrossissage il peut être choisi un niveau de l'ordre de 20 cd/m² pour les cas les moins exigeants et de 40 cd/m² pour les situations les plus sévères.

2.4 - Pertes d'efficacité de l'installation

Les luminances indiquées ci-dessus pour les différentes zones (entrée, section courante, sortie) sont celles qui doivent être obtenues dans des conditions d'exploitation normales, c'est à dire compte tenu du vieillissement des sources lumineuses et de la salissure. Les niveaux à la mise en service doivent donc tenir compte de la politique d'entretien de l'installation. Celle-ci est caractérisée par le facteur de maintenance (M) qui prend en compte :

- la salissure des appareils, liée à la fréquence des nettoyages ;
- la politique de remplacement des sources lumineuses dont le vieillissement entraîne une baisse du flux lumineux ;
- éventuellement, la température ambiante si l'on s'attend à des conditions particulièrement difficiles (basses températures).

De fait, le facteur de maintenance est extrêmement variable et peut être compris entre 0,5 et près de 1. Il dépend de la nature des sources et de la politique suivie concernant l'entretien, ce qui montre l'intérêt d'un nettoyage fréquent des luminaires et des piédroits et d'un remplacement régulier des lampes usées.

En pratique, les projets sont généralement conçus sur la base d'une politique sérieuse d'entretien qui permet de prendre un facteur M (salissure + vieillissement) égal à 76 % (pour les sources sodium haute et basse pression comme pour les tubes fluorescents).

Ce chiffre incorpore un coefficient de 80 % pour la salissure et de 95 % pour le vieillissement des sources.

On voit donc toute l'importance de l'exploitation de l'installation. En effet, la salissure ou des sources en mauvais état peuvent faire chuter le flux bien en dessous des limites choisies au projet si l'on n'y prend garde.

Eclairage des tunnels courts

Plus encore que pour les tunnels longs, l'éclairage des tunnels courts est un problème spécifique à chaque ouvrage, dans lequel la géométrie du tunnel, son approche, l'environnement, la nature et l'intensité du trafic jouent un rôle primordial. Il y a lieu, dans chaque cas, de procéder à une étude spécifique. En effet les tunnels courts peuvent poser des problèmes de visibilité plus délicats que les tunnels longs, du fait de défauts d'adaptation visuelle (par exemple il n'y a pas adaptation à la faible luminance du tunnel lorsque la sortie ou une partie de la sortie, très lumineuse, occupe une partie notable du champ de vision).

C'est pourquoi les arbres de décision qui figurent ci-après ne doivent être utilisés qu'à titre d'élément d'appréciation : d'autres facteurs interviennent comme le précise le § 3.5.

3.1 - Définition

Comme indiqué au § 1.2, est considéré comme "court" pour la conception de l'éclairage un tunnel qui ne possède pas de section courante d'éclairage diurne. L'éclairage d'entrée peut en outre être réduit en niveau par rapport à celui d'un tunnel long de conditions d'approche identiques, voire même supprimé. Cette question doit être examinée lorsque la longueur du tunnel ne dépasse pas la limite d'application des arbres de décision ci-après, à savoir :

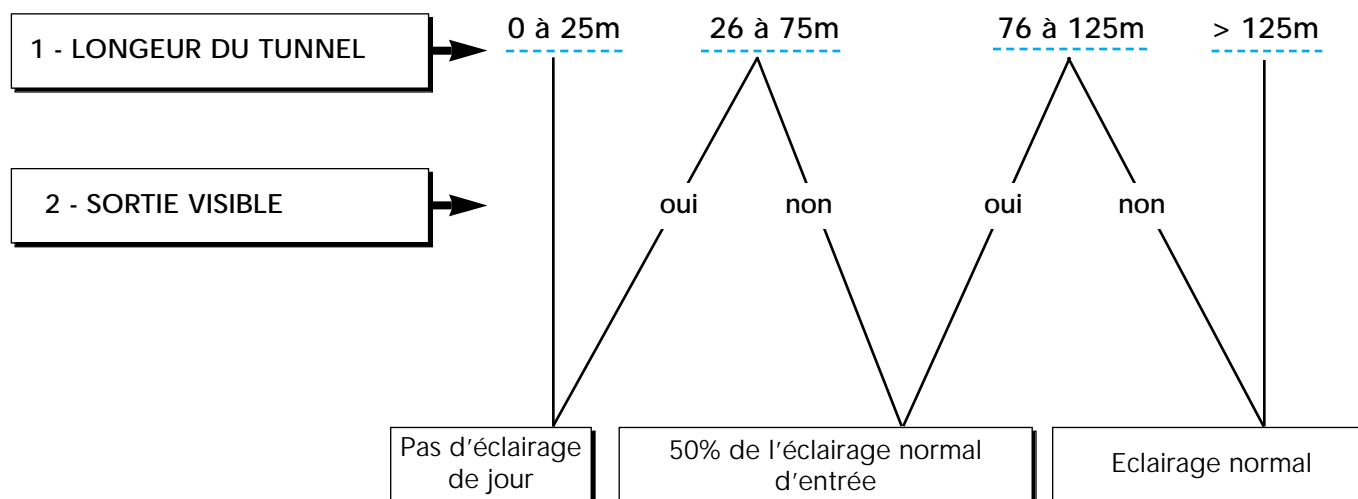
- 125 m pour un tunnel urbain,
- 150 m pour un tunnel interurbain bidirectionnel à fort trafic ou vitesse importante,
- 200 m pour un tunnel interurbain unidirectionnel à fort trafic ou vitesse importante,
- 200 m pour un tunnel interurbain à faible trafic et à vitesse réduite.

3.2 - Tunnels urbains

Les ouvrages urbains sont caractérisés par un milieu complexe, un éclairage de nuit qui le plus souvent assure la continuité avec l'éclairage urbain extérieur, un trafic de pointe quotidienne important avec risque de congestion et enfin dans certains cas, la présence de deux roues ou de piétons.

Une ambiance agréable doit être recherchée par la mise en œuvre de piédroits clairs et diffusants et de préférence d'une chaussée assez claire. Lorsqu'un éclairage diurne est nécessaire, les luminaires sont généralement du type symétrique et les sources sont choisies pour assurer un bon rendu des couleurs.

L'arbre de décision n°1 suivant présente les principaux éléments permettant de faire le choix de la mise en place ou non d'un éclairage diurne, et de son niveau.



▲ **Arbre de décision n° 1 - Tunnels urbains**

Commentaires :

1 - Sortie visible :

Ce critère signifie que la totalité de la sortie est visible par un automobiliste situé à la distance d'arrêt en amont de l'entrée du tunnel, comme les croquis du schéma n° 7 le montrent.

Il en résulte que les accès, le tracé et le profil en long d'un tel tunnel ne doivent pas présenter de courbes trop prononcées qui coupent tout ou partie du gabarit de la sortie.

2 - Eclairage normal :

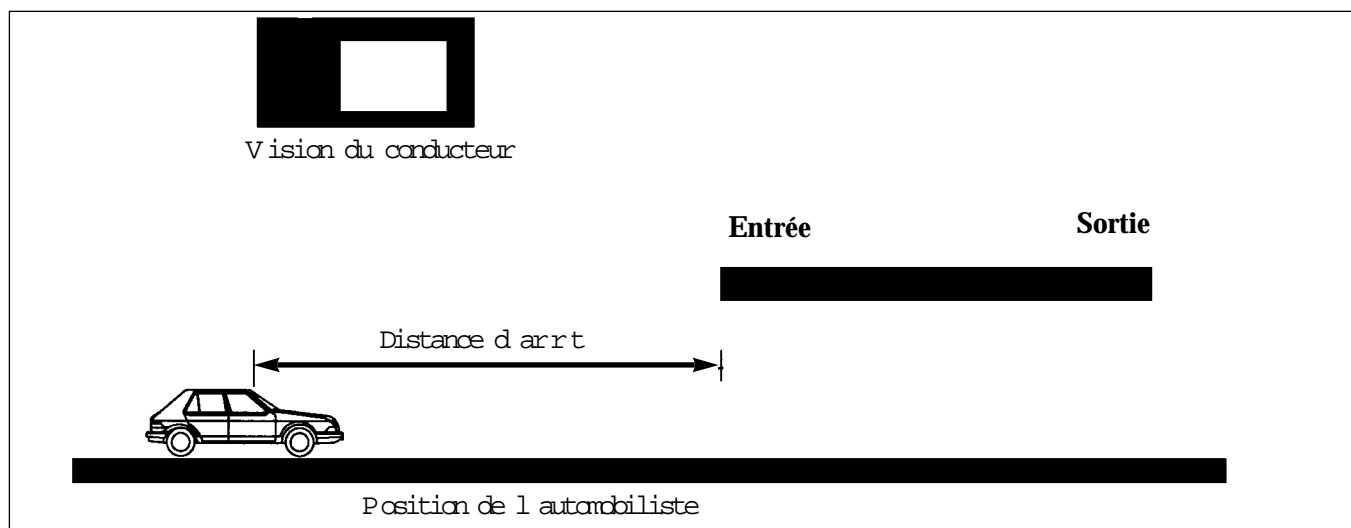
Il s'agit d'une installation dimensionnée comme la zone d'entrée d'un tunnel long.

3 - Cas particuliers des tunnels autorisés aux piétons et/ou aux cyclistes

Que la sortie soit visible ou non, on met en place un éclairage à un niveau normal dès que la longueur dépasse 25 m.



▲ **Photo n° 11 - Trémie des Brotteaux à Lyon (la condition de "sortie visible" n'est pas remplie)**



▲ **Schéma n°7**

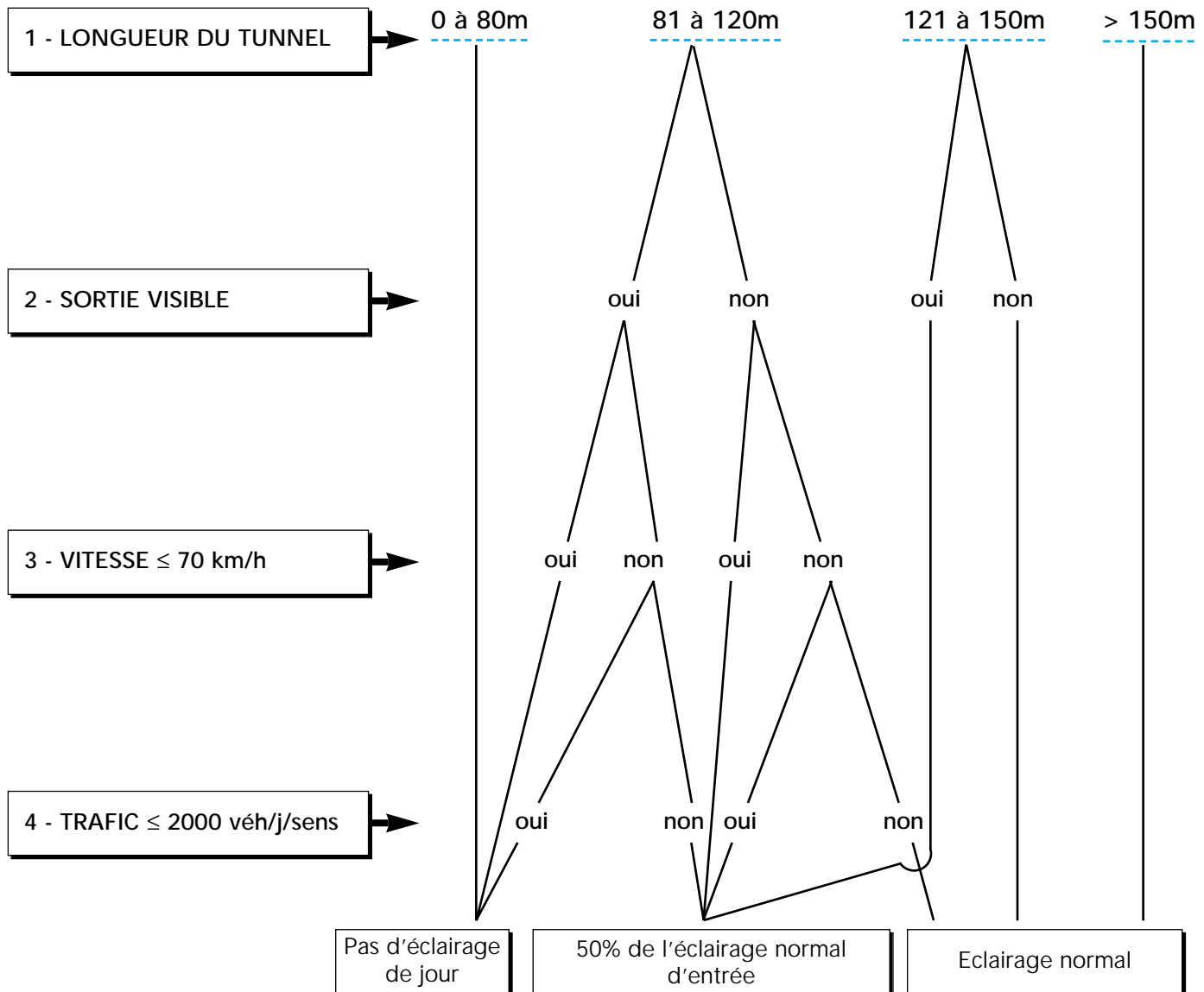
3.3 - Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse importante

Le présent paragraphe concerne les tunnels interurbains dont le trafic d'un sens de circulation dépasse 2 000 véhicules par jour en moyenne annuelle, ou dont la vitesse autorisée est supérieure à 70 km/h.

C'est le cas général des tunnels sur autoroutes ou routes de catégorie exceptionnelle. Le trafic est important ou la vitesse élevée, mais l'approche est dégagée et le tracé présente de bonnes caractéristiques. Les piétons et cyclistes sont interdits.

3.3.1 - Tunnels bidirectionnels

Les principaux éléments du choix de l'éclairage sont présentés dans l'arbre de décision n° 2, où les mentions "sortie visible" et "éclairage normal" ont la même signification qu'au § 3.2 .



▲ **Arbre de décision n° 2 - Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse élevée - Circulation bidirectionnelle**

3.3.2 - Tunnels unidirectionnels

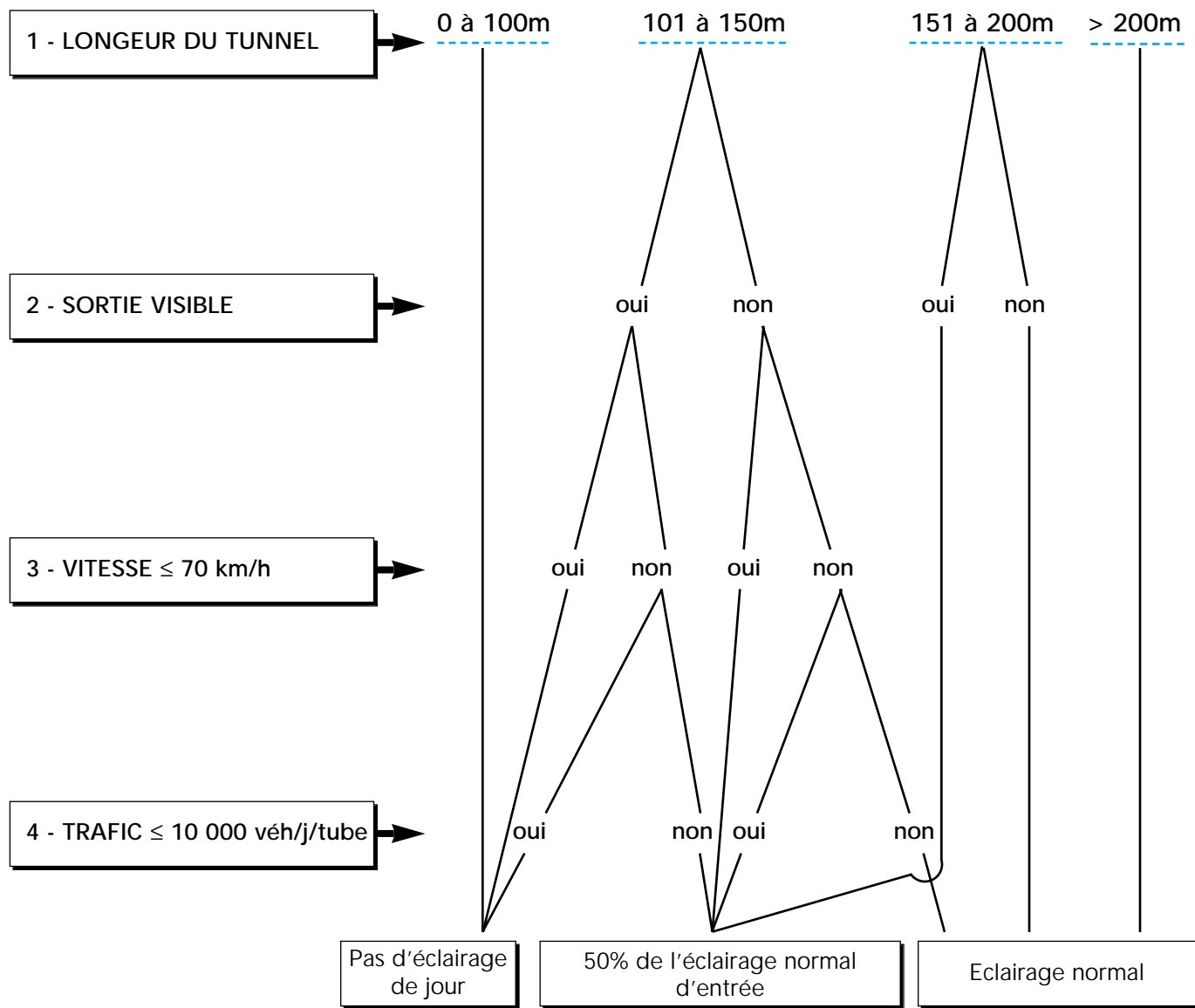
C'est le domaine privilégié de l'éclairage à contre-flux. De jour, la forte luminance de la sortie visible directement ou par réflexion sur les piédroits ne permet de bien voir les obstacles qu'en contraste négatif (en sombre sur fond clair).

Une peinture claire et spéculaire des piédroits est souhaitable pour donner le maximum de contraste négatif aux obstacles éventuels.

Les principaux éléments de choix de l'éclairage de ces tunnels sont présentés dans l'arbre de décision n° 3 :



▲ Photo n° 12 - Tunnel de Langesse sur l'autoroute A8 (la condition de "sortie visible" est remplie)



▲ Arbre de décision n° 3 - Tunnels interurbains à fort trafic ou à vitesse élevée - Circulation unidirectionnelle

3.4 - Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite

Dans ces ouvrages, le trafic est peu important (voir § 1.3) et la vitesse autorisée inférieure ou égale à 70 km/h. Il s'agit en général de tunnels bidirectionnels.

Le choix de l'éclairage doit tenir compte des caractéristiques photométriques des entrées et de leur environnement, de la vitesse prescrite et du tracé d'approche.

Un revêtement de piédroits clair est là encore à recommander. Il doit être diffusant pour l'éclairage symétrique, le mieux adapté à une circulation bidirectionnelle à vitesse réduite.

L'arbre de décision n° 4 présente les éléments les plus déterminants pour les choix d'éclairage.

Il est rappelé que le paragraphe 1.3 décrit les conditions de très faible trafic dans lesquelles ce type de tunnel peut ne pas être éclairé, quelle que soit sa longueur, et les mesures qu'il convient alors de prendre.

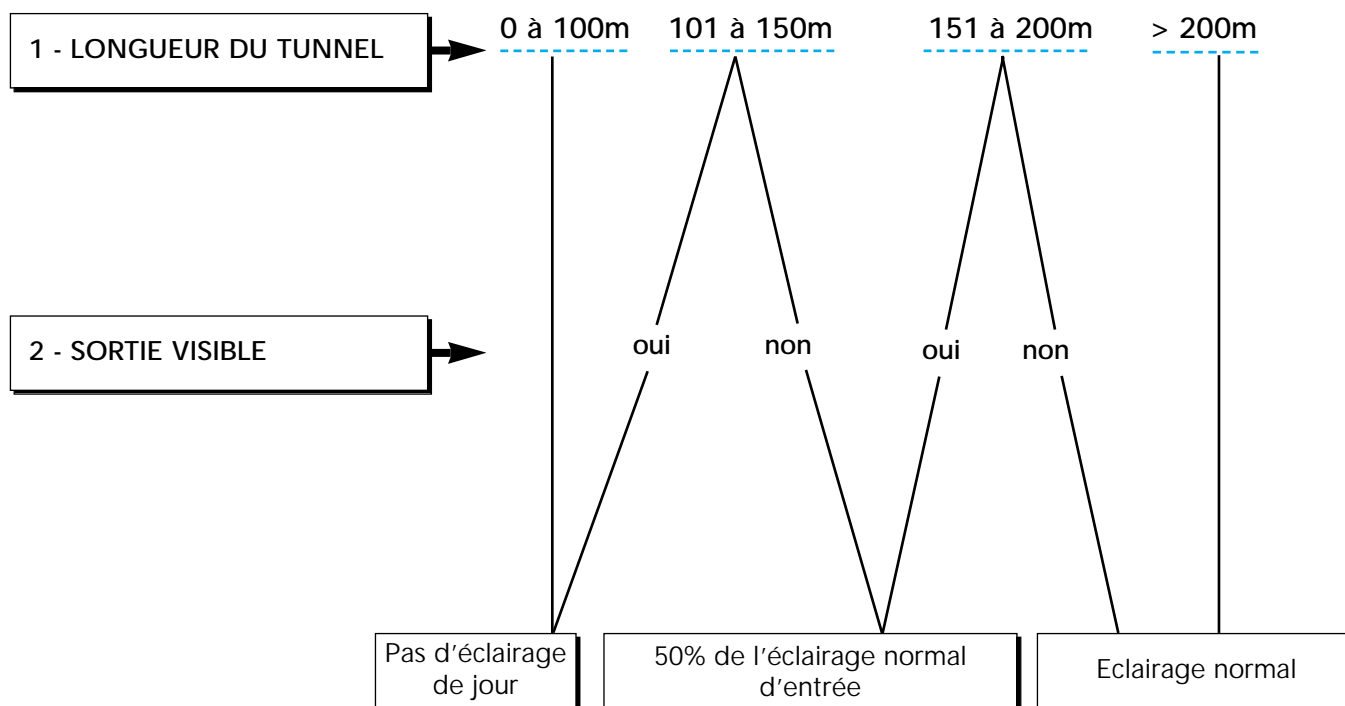
3.5 - Commentaires d'emploi

Les facteurs figurant dans les arbres de décision précédents ne sont pas les seuls à considérer. Ils permettent de guider une première approche du problème, mais ne dispensent pas d'une analyse du trafic et de la géométrie des accès du tunnel, en plan et en profil en long, orientée vers la lisibilité de l'itinéraire.

Ces arbres de décision sont conçus pour des tunnels interdits au transit des marchandises dangereuses. Dans le cas contraire une étude spécifique doit être effectuée et peut conduire à choisir des critères plus sévères.

Dans tous les cas, le dimensionnement de l'éclairage est effectué sans prendre en compte les caractéristiques photométriques des piédroits. Mais si ceux-ci ne sont pas revêtus, ou sont très sales et très peu réfléchissants, on peut être conduit à choisir le critère "sortie non visible".

Certains facteurs ne sont pas évoqués car plus complexes, notamment lorsque le profil en long est pénalisant et qu'il y a une proportion notable de poids lourds. Dans certains cas difficiles conduisant à une incertitude, il est recommandé d'adopter le choix apportant la meilleure visibilité.



▲ **Arbre de décision n° 4 - Tunnels interurbains à faible trafic et à vitesse réduite**

3.6 - Guidage

Pour tous les tunnels ne comportant pas un éclairage normal, le guidage revêt une grande importance et doit donc être particulièrement soigné (choix, pose, entretien et nettoyage du matériel). Il peut comporter :

- au sol, marquages rétro réfléchissants,
- sur les piédroits :
 - plots rétro réfléchissants (délinéateurs, jalonneurs),
 - bandes ou films rétro réfléchissants
 - diodes électroluminescentes
 - plots de balisage lumineux ou hublots
 - etc.

3.7 - Eclairage nocturne

Pour les ouvrages équipés d'une installation d'éclairage diurne, il convient, dans les mêmes conditions et avec les mêmes exceptions que pour les tunnels longs, de prévoir un régime d'éclairage réduit. Dans les autres ouvrages (surtout s'ils sont urbains ou autoroutiers), il est conseillé de prévoir un éclairage nocturne ou un simple balisage destiné à souligner les points singuliers qu'ils constituent sur l'itinéraire.

L'éclairage nocturne du tunnel est indispensable lorsque les parties à l'air libre sont elles-mêmes éclairées. On doit veiller dans tous les cas à ne pas introduire de brusques variations dans les conditions de vision tant en entrée qu'en sortie.

Influence de la chaussée

4.1 Rôle photométrique du revêtement de chaussée

Le but principal d'une installation d'éclairage est de permettre au conducteur de percevoir en temps utile un éventuel obstacle situé sur la chaussée, en assurant un contraste suffisant entre les luminances respectives de l'obstacle et de la chaussée. La luminance de chaussée a donc un rôle primordial et c'est vers la détermination puis l'obtention de sa valeur optimale que sont orientées les études d'éclairage.

Le revêtement de chaussée se comporte comme un réflecteur qui renvoie vers le conducteur une part plus ou moins importante de la lumière qu'il reçoit.

C'est pourquoi il est nécessaire de porter une attention particulière aux caractéristiques photométriques de la chaussée. S'il est concevable de retenir pour celles-ci des valeurs moyennes lors du projet d'éclairage au niveau de l'étude préliminaire, il faut en revanche que le type de revêtement soit choisi lors du projet d'ouvrage d'art et que le dimensionnement de l'éclairage en tienne compte.



▲ **Photo n° 13 - Voies de circulation claires et bande d'arrêt d'urgence sombre (la bande d'arrêt sombre est à déconseiller en tunnel)**

4.2 - Caractérisation photométrique des revêtements de chaussée

4.2.1 - Facteur de réflexion diffuse, coefficient de clarté et rapport R

Pour les besoins du projet d'éclairage, on assimile souvent la chaussée à une surface parfaitement diffusante, ainsi que cela a été indiqué au chapitre 1. Ceci permet d'utiliser la loi de Lambert pour passer des valeurs de la luminance de chaussée aux éclairagements que doit fournir l'installation :

$$E = \frac{\pi}{\rho} L$$

où E est l'éclairagement en lux
 L la luminance en cd/m^2
 et ρ le facteur de réflexion diffuse de la surface.

Cette relation permet de caractériser le revêtement par un seul paramètre, son facteur de réflexion diffuse. Bien que les chaussées ne soient jamais parfaitement diffusantes, cette approche est tout à fait suffisante pour l'étude des installations symétriques classiques.

En revanche, le système à contre-flux donne une grande importance à la spécularité de la chaussée, c'est à dire à sa tendance à se comporter plus ou moins comme un miroir et donc à renvoyer préférentiellement la lumière dans la direction opposée à celle d'où elle vient.

Afin de simplifier les études, il est possible de généraliser la loi de Lambert en définissant un coefficient de clarté c de façon à obtenir la même relation :

$$E = \frac{\pi}{c} L$$

où cette fois-ci E est l'éclairagement moyen produit par l'installation particulière qu'on étudie et L la luminance

moyenne de la chaussée mesurée dans la direction selon laquelle l'automobiliste voit celle-ci.

Le coefficient c dépend en effet en principe non seulement des caractéristiques de la chaussée, mais aussi de celles de l'installation et de la direction d'observation. Toutefois, comme la conduite routière se fait avec un angle de vision à peu près constant et que les installations d'éclairage de tunnel ont des caractéristiques d'implantation comparables, on peut considérer que le coefficient de clarté c est constant pour une chaussée et un type d'éclairage (symétrique ou à contre-flux) donnés.

On peut encore simplifier la relation précédente en utilisant le rapport \mathcal{R} couramment utilisé en éclairage public, et en écrivant que :

$$E = \mathcal{R} \times L$$

avec rapport $\mathcal{R} = \pi/c$ (c étant le coefficient de clarté) Il faut toutefois rappeler que le rapport \mathcal{R} dépend des caractéristiques de la chaussée et de celles de l'installation ce qui signifie que, pour un même revêtement, ce rapport va prendre des valeurs très différentes suivant que l'on est en éclairage extérieur, en éclairage tunnel symétrique ou à contre-flux.

4.2.2 - La classification de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E)

La C.I.E. [Réf. 7] a décrit le comportement photométrique des revêtements de chaussée. De façon simplifiée, celui-ci peut être caractérisé par deux paramètres :

- le coefficient de luminance moyenne Q_0 , qui rend compte de la clarté de la surface (il augmente proportionnellement au pourcentage de lumière reçue qui est réémise),
- le coefficient de spécularité S_1 , qui caractérise l'aptitude du revêtement à renvoyer la lumière dans une direction privilégiée (il augmente d'autant plus que le revêtement a tendance à se comporter comme un miroir).

Ces paramètres sont indépendants ; il est possible d'avoir une surface très spéculaire (S_1 élevé) et très sombre (Q_0 faible), par exemple une peinture laquée noire, ou une surface peu spéculaire (S_1 faible) et très claire (Q_0 élevé) par exemple une peinture mate blanche.

La CIE a réparti les revêtements de chaussée en quatre classes en fonction de la valeur du coefficient de spécularité S_1 .

Comme le montre le tableau suivant, les surfaces sont de plus en plus spéculaires en allant de la classe 1 vers la 4.

Classe	Condition sur S_1
1	$S_1 < 0,42$
2	$0,42 \leq S_1 < 0,85$
3	$0,85 \leq S_1 < 1,35$
4	$1,35 \leq S_1$

Pour chaque classe, un revêtement standard, typique de la classe, est également défini. Le tableau suivant donne les valeurs retenues pour le coefficient de luminance moyenne Q_0 et le coefficient de spécularité S_1 des revêtements standards :

Revêtement standard de chaque classe CIE	Q_0	S_1
R_1	0,10	0,25
R_2	0,07	0,58
R_3	0,07	1,11
R_4	0,08	1,55

Lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage, en l'absence de prélèvement d'un échantillon sur site permettant la mesure des caractéristiques photométriques de la chaussée, on peut estimer la classe à laquelle appartient le revêtement ainsi que sa clarté à partir de mesures réalisées sur des revêtements similaires. Pour réaliser le calcul de la luminance de la chaussée, on utilise alors les valeurs types du revêtement standard de la CIE correspondant à la classe à laquelle le revêtement se rattache.

Si on estime que la valeur du coefficient de luminance moyenne Q_0 du revêtement est différente de celle du revêtement standard utilisé, les luminances calculées devront être multipliées par un facteur égal à :

$$\frac{Q_0 \text{ estimé}}{Q_0 \text{ standard}}$$

Un enrobé neuf est habituellement spéculaire (classe R₄) car un film de bitume recouvre les granulats. Sous l'effet de la circulation, au bout de quelques mois, le film de bitume s'enlève, la chaussée devient moins spéculaire, puis les propriétés photométriques du revêtement se stabilisent. En France la majorité des revêtements de chaussée sont de classe 2 ou 3.

Cette évolution est aussi constatée avec les enrobés drainants qui sont très spéculaires (classe 4 de la CIE) et sombres à la mise en service, puis deviennent progressivement moins spéculaires (évolution vers des valeurs S₁ les situant entre les classes 2 et 3) mais restent sombres (peu de variation de Q₀).

4.2.3 - Types de chaussée

On distingue classiquement les couches de surface en béton bitumineux, réputées très sombres, et celles en béton de ciment, sensiblement plus claires.

L'utilisation d'un béton de ciment n'est en fait pas la seule solution pour obtenir un revêtement relativement clair, car on peut réaliser des chaussées bitumineuses dites "éclaircies" et des chaussées dites "très claires".

Par **chaussées éclaircies**, on entend les bétons bitumineux à liant noir mais à agrégats clairs. Ceux-ci ne s'éclaircissent toutefois qu'après un certain temps de circulation, nécessaire pour faire disparaître le film superficiel de liant, sauf s'il a été procédé à un décapage initial (mais celui-ci est délicat et à la date de rédaction du présent document, il ne conduit pas toujours à l'éclaircissement souhaité).

Les **chaussées très claires** désignent des enrobés réalisés avec un liant synthétique clair et des granulats blancs. Elles peuvent présenter un coefficient de clarté particulièrement élevé à la mise en service.

Toutefois sous l'effet de la circulation elles deviennent progressivement moins claires. Malheureusement, à la date de publication du présent document, les données disponibles ne permettent pas d'apprécier avec certitude si cet assombrissement est important. Des indications plus précises seront publiées ultérieurement.

Le tableau suivant donne des ordres de grandeur des coefficients de clarté de différents types de couches de surface pour une installation d'éclairage de type symétrique.

Type de couche de roulement	Ordre de grandeur de c en système symétrique
Béton bitumineux avec granulats sombres	0,13
Béton bitumineux moyen	0,15
Béton de ciment sombre	0,18
Béton bitumineux avec granulats clairs (éclairci)	0,18 à 0,24
Béton de ciment clair	0,24
Enrobé très clair	0,30 à 0,40 (*)

(*) valeurs atteintes pour un revêtement installé et circulé depuis environ 3 mois

4.3 - Influence du revêtement sur les besoins en éclairage

Comme on l'a vu au § 4.2.2, le comportement photométrique des chaussées présente deux caractéristiques indépendantes et complémentaires : la clarté et la spécularité. Le présent paragraphe examine l'influence de celles-ci sur les niveaux d'éclairage à installer.

Cette influence intervient à deux niveaux :

- le calcul des luminances nécessaires pour assurer la visibilité,
- le passage des luminances aux éclairages.

Ces deux effets vont en général dans le même sens et le second est nettement prépondérant : les paragraphes qui suivent sont consacrés à ce dernier. *Q u e l q u e s* niveaux de luminances représentatifs des situations habituelles en section courante et dans les zones de renforcements servent à illustrer le cas des systèmes symétriques. Pour les systèmes à contre-flux, seules des luminances typiques des renforcements sont considérées.



▲ **Photo n°14 - Chaussée claire dans le tunnel du Chatelard (RN 205 - Haute-Savoie)**
La chaussée claire aurait dû commencer une dizaine de mètres après l'entrée

4.3.1 - Système symétrique

◆ Influence de la clarté de la chaussée

Le tableau ci-dessous considère trois chaussées ayant une même spécularité $S_1 = 0,58$ (celle du revêtement standard R_2). Elles diffèrent par leur coefficient de luminance moyenne Q_0 :

- chaussée sombre $Q_0 = 0,05$
- chaussée éclaircie $Q_0 = 0,07$ (revêtement standard R_2)
- chaussée très claire $Q_0 = 0,12$

	Luminance requise	Éclaircement correspondant
	(section courante)	
Chaussée sombre (biton bitumineux classique)* $c = 0,10$ $R = 31$	2 cd/m ²	62 lux
	4 cd/m ²	124 lux
	6 cd/m ²	186 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	1 550 lux
100 cd/m ²	3 100 lux	
	(section courante)	
Chaussée éclaircie (biton bitumineux avec granulats clairs) $c = 0,18$ $R = 17$	2 cd/m ²	34 lux
	4 cd/m ²	68 lux
	6 cd/m ²	102 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	850 lux
100 cd/m ²	1 700 lux	
	(section courante)	
Chaussée très claire (enrobé avec liant clair et agrégats blancs) $c = 0,31$ $R = 10$	2 cd/m ²	20 lux
	4 cd/m ²	40 lux
	6 cd/m ²	60 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	500 lux
100 cd/m ²	1 700 lux	

(*) cas à éviter en tunnel

La forte influence de la clarté du revêtement apparaît très nettement puisque les niveaux d'éclaircement à mettre en œuvre varient de plus du simple au double (ils sont inversement proportionnels au coefficient de luminance moyenne Q_0 du revêtement).

◆ Influence de la spécularité de la chaussée

Le tableau suivant considère quatre chaussées de même coefficient de luminance moyenne ($Q_0 = 0,07$), mais ayant les spécularités typiques des quatre revêtements standards de la C.I.E.

	Luminance requise	Éclaircement correspondant
	(section courante)	
Revêtement de classe 1 ($S_1 = 0,25$) $c = 0,18$ $R = 17$	2 cd/m ²	34 lux
	4 cd/m ²	68 lux
	6 cd/m ²	102 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	850 lux
100 cd/m ²	1 700 lux	
	(section courante)	
Revêtement de classe 2 ($S_1 = 0,58$) $c = 0,18$ $R = 17$	2 cd/m ²	34 lux
	4 cd/m ²	68 lux
	6 cd/m ²	102 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	850 lux
100 cd/m ²	1 700 lux	
	(section courante)	
Revêtement de classe 3 ($S_1 = 1,11$) $c = 0,17$ $R = 19$	2 cd/m ²	38 lux
	4 cd/m ²	76 lux
	6 cd/m ²	114 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	950 lux
100 cd/m ²	1 900 lux	
	(section courante)	
Revêtement de classe 4 ($S_1 = 1,55$) $c = 0,14$ $R = 22$	2 cd/m ²	44 lux
	4 cd/m ²	88 lux
	6 cd/m ²	132 lux
	(renforcement)	
	50 cd/m ²	1 100 lux
100 cd/m ²	2 200 lux	

A clarté fixée, la spécularité du revêtement a donc une influence réelle mais limitée sur les besoins en éclairage avec un éclairage symétrique. Il apparaît un avantage aux chaussées peu spéculaires (classes 1 et 2).

4.3.2 - Système à contre-flux

Dans ce système, non seulement la clarté et la spécularité du revêtement jouent un rôle, mais aussi les caractéristiques photométriques des luminaires.

Un paramètre particulièrement important est l'angle d'intensité lumineuse maximale α_{\max} , qui est l'angle entre la verticale et la direction dans laquelle le luminaire émet son intensité maximale.

Pour cette raison, les influences de la clarté et de la spécularité du revêtement sont examinées ci-après en fixant l'angle α_{\max} dans une plage limitée (entre 50 et 58°), et les résultats en éclairage n'apparaissent pas sous la forme d'une valeur unique mais d'un intervalle de valeurs. Un tableau supplémentaire montre l'influence du choix de α_{\max} .

◆ Influence de la clarté de la chaussée

Comme dans le cas du système symétrique, le tableau ci-dessous considère trois chaussées de même spécularité (celle du revêtement standard R_2). Elles diffèrent par leur coefficient de luminance moyenne Q_0 :

- chaussée sombre $Q_0 = 0,05$
- chaussée éclaircie $Q_0 = 0,07$ (revêtement standard R_2)
- chaussée très claire $Q_0 = 0,12$

	Luminance requise	Éclairage correspondant
Chaussée sombre (bitumeux classique)* $c = 0,19 \quad 0,16$ $R = 17 \text{ à } 20$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	850 1 000 lux 1 700 2 000 lux
Chaussée éclaircie (bitumeux avec granulés clairs) $c = 0,26 \quad 0,22$ $R = 11 \text{ à } 14$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	550 700 lux 1 100 1 400 lux
Chaussée très claire (enrobé avec liant clair agrégats blancs) $c = 0,40 \quad 0,35$ $R = 8 \text{ à } 9$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	400 450 lux 800 900 lux

On constate la même influence de la clarté du revêtement que dans le système symétrique : le besoin en éclairage, qui est inversement proportionnel au coefficient de luminance moyenne Q_0 , varie de plus du simple au double. En outre, à niveau de luminance requise identique, le niveau d'éclairage est inférieur de 20 à 30 % à celui nécessaire en système symétrique.

Rappelons qu'en système à contre-flux, le besoin en luminance est lui-même plus faible qu'en système symétrique : il y a là deux effets qui se cumulent (voir toutefois le dernier alinéa § 4.3.3).

◆ Influence de la spécularité de la chaussée.

Le tableau ci-après est établi pour quatre chaussées de même coefficient de luminance moyenne ($Q_0 = 0,07$), mais ayant des spécularités différentes (celles des quatre revêtements standard de la C.I.E.). L'angle d'intensité lumineuse maximale $\alpha_{I_{\max}}$ est toujours tel que $\alpha_{I_{\max}} \cdot 50^\circ \leq \alpha_{I_{\max}} < 58^\circ$.

	Luminance requise	Éclairage correspondant
Revêtement de classe 1 ($S_1 = 0,25$) $c = 0,20 \quad 0,21$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	750 800 lux 1 500 1 600 lux
$R = 15 \quad 16$ Revêtement de classe 2 ($S_1 = 0,58$) $c = 0,29 \quad 0,24$ $R = 11 \text{ à } 13$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	550 650 lux 1 100 1 300 lux
Revêtement de classe 3 ($S_1 = 1,11$) $c = 0,29 \quad 0,24$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	550 650 lux 1 100 1 300 lux
$R = 11 \quad 13$ Revêtement de classe 4 ($S_1 = 1,55$) $c = 0,26 \quad 0,22$ $R = 12 \text{ à } 14$	(renforcement)	
	50 cd/m ² 100 cd/m ²	600 700 lux 1 200 1 400 lux

La spécularité du revêtement n'a pas en contre-flux une influence beaucoup plus importante qu'en système symétrique, mais elle joue différemment : ce sont ici les revêtements les moins spéculaires (classe 1) qui demandent un supplément d'éclairage (de 20 à 40 %) pour produire la même luminance.

Une seconde raison conduit à préférer les revêtements spéculaires en contre-flux : l'obtention d'un paramètre de qualité de contraste suffisamment élevé suppose que la face des obstacles située du côté de l'entrée soit la moins éclairée possible, et il faut donc que la chaussée diffuse le moins possible de lumière dans la direction de la circulation.

Cependant les revêtements les plus spéculaires ne sont pas toujours les plus avantageux pour obtenir un niveau de luminance donnée, car la direction dans laquelle la luminance d'un revêtement très spéculaire est maximale ne correspond pas nécessairement à la direction d'observation des automobilistes.

Une optimisation nécessiterait de considérer simultanément les caractéristiques photométriques de la chaussée et des luminaires, ainsi que l'implantation de ceux-ci.

◆ **Influence de l'angle d'intensité maximale du luminaire**

Le tableau suivant est établi pour le revêtement standard R₂.

	Luminance requise	Éclairage correspondant
α I _{max} < 50 _i c = 0,24 0,20 R = 13 16	50 cd/m ² 100 cd/m ²	650 800 lux 1 300 1 600 lux
50 _i ≤ α I _{max} < 58 _i c = 0,29 0,24 R = 11 13	50 cd/m ² 100 cd/m ²	550 650 lux 1 100 1 300 lux
58 _i ≤ α I _{max} < 60 _i c = 0,31 0,29 R = 10 11	50 cd/m ² 100 cd/m ²	500 550 lux 1 000 1 100 lux
α I _{max} ≥ 60 _i c = 0,39 0,35 R = 8 9	50 cd/m ² 100 cd/m ²	400 450 lux 800 900 lux

Il apparaît bien sûr que plus la direction d'intensité maximale est proche de l'horizontale, moins le niveau d'éclairage a besoin d'être élevé. Ceci trouve toutefois ses limites dans les conditions de non-éblouissement des automobilistes par le luminaire.

4.3.3 - Conclusions sur l'influence du revêtement

Les exemples décrits ci-dessus mettent bien en évidence l'influence du revêtement de chaussée pour passer du dimensionnement en luminance aux besoins en éclairage.

Quel que soit le système d'éclairage, une plus grande clarté du revêtement permet de réduire de façon très appréciable les niveaux d'éclairage conduisant à la même luminance : le gain est de l'ordre de 40 à 50 % lorsqu'on passe d'une chaussée sombre à une chaussée éclaircie, et de l'ordre de 30 à 40 % lorsqu'on passe de cette dernière à une chaussée très claire. Pour ce dernier type de chaussée, la clarté évolue dans le temps, mais comme indiqué ci-avant, les données manquent aujourd'hui pour bien évaluer l'importance de cette évolution.

La specularité joue également un rôle, mais celui-ci est moins déterminant. Il doit conduire à éviter les chaussées très spéculaires (classe 4) en système symétrique, et au contraire les chaussées très diffusantes (classe 1) en contre-flux.

Comme indiqué au début du § 4.3, les caractéristiques du revêtement de chaussée ont aussi une certaine influence sur le dimensionnement des niveaux de luminance requis dans les zones d'entrée. Les valeurs données à titre de première approche au chapitre 2

correspondent à des revêtements "moyens" (voisins du revêtement standard R₂). Lors du projet détaillé, le dimensionnement doit prendre en compte le revêtement prévu, à la fois pour le calcul des luminances et pour le passage aux éclairages.

4.4 - Choix du revêtement de chaussée

Deux conclusions s'imposent :

- le projet d'éclairage doit tenir compte des choix faits en matière de chaussée,
- mieux encore, le choix de la couche de surface doit intégrer les considérations d'éclairage.

La section "Chaussées" du document "Génie civil" décrit l'ensemble des contraintes qui pèsent sur le choix du type de chaussée en général et de la couche de roulement en particulier. Les considérations photométriques ne sont bien sûr qu'un élément parmi d'autres, mais il convient de ne pas les négliger.

Dans le cas le plus fréquent d'une chaussée à revêtement bitumineux, il devrait y avoir intérêt à prévoir des granulats clairs à l'intérieur du tunnel (chaussée éclaircie). Des travaux sont en cours pour permettre de quantifier les coûts et avantages.

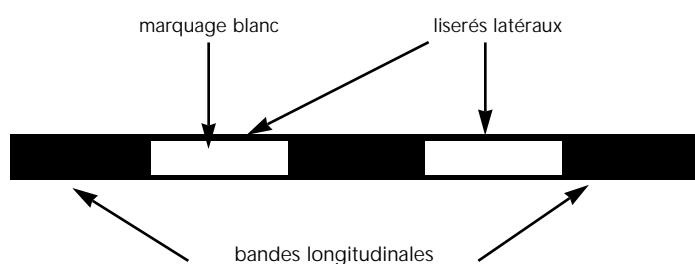
Toutefois les granulats clairs n'apparaissent qu'au fur et à mesure de l'usure de la couche de liant en surface, et les méthodes de décapage destinées à faire apparaître les granulats dès la mise en service ne sont pas encore suffisamment au point à la date de rédaction du présent document pour garantir un éclaircissement effectif du revêtement.

L'adoption d'une couche de roulement très claire, avec liant synthétique clair et granulats blancs, peut être envisagée sous réserve d'avoir des assurances sur le maintien dans le temps des caractéristiques photométriques de ce type de produit. Le surcoût est plus conséquent et ne peut généralement s'amortir que dans les zones de renforcement d'éclairage. La clarté d'un tel revêtement diminue après la mise en service ; pour le calcul des niveaux d'éclairage il ne faut donc pas retenir les caractéristiques photométriques à la mise en service mais celles atteintes après quelques années. A noter que ce revêtement ne doit commencer qu'une dizaine de mètres après l'entrée en tunnel pour éviter tout éblouissement des conducteurs à l'approche de la tête.

Le marquage réglementaire sur chaussée très claire doit être visible et ne pas déroger aux accords de Genève (couleur blanche du marquage définitif). Une solution consiste à faire ressortir le marquage blanc avec un marquage noir comportant :

- des liserés latéraux de 4 cm de largeur,
- des bandes longitudinales

Dans tous les cas la mise en œuvre de niveaux d'éclairissement réduits du fait d'un revêtement de chaussée clair ou très clair (coefficient de clarté supérieur à 0,18 pour un système symétrique), implique que les réparations futures soient faites dans le même matériau et que les renouvellements de la couche de roulement utilisent un matériau au moins aussi clair. Ceci exclut par exemple la solution d'entretien d'un béton de ciment clair qui consiste à le recouvrir par une couche bitumineuse plus sombre, ou le remplacement d'un enrobé très clair par un revêtement seulement éclairci.



▲ **Schéma n°8**

Conception de l'installation

5.1 - Conditions générales

L'implantation et le choix de la nature des luminaires obéissent, dans les tunnels, à des contraintes différentes de celles qui sont rencontrées à l'air libre. Ceci tient principalement à la salissure et aux difficultés d'entretien, ainsi qu'aux conditions photométriques résultant de la faible hauteur d'implantation des sources.

5.2 - Types d'installations

5.2.1 - Appareils étanches à flux dirigé de type classique

Dans une installation symétrique de type classique, les luminaires à flux dirigé ont la double fonction :

- ◆ de diriger le flux lumineux sur la chaussée et la base des piliers,
- ◆ de protéger des poussières les sources, appareillages et réflecteurs : les parties transparentes des appareils sont en effet plus aisément nettoyables et n'ont pas sur les poussières le même effet électrostatique attractif que les sources.

On s'efforce d'implanter les luminaires en utilisant la place disponible dans la section de l'ouvrage, et en évitant le plus possible d'en agrandir l'excavation.



▲ Photo n° 15 - Appareils symétriques à tubes fluorescents dans le tunnel de Dame-Joliette (Marseille)



▲ **Photo n° 16 - Galerie latérale d'éclairage dans la tranchée couverte de Champigny (Autoroute A4 - Val de Marne)**

5.2.2 - Galerie spéciale d'éclairage

Dans les tunnels en zone urbaine, la période de réduction du trafic nocturne pendant laquelle peuvent se situer les interventions sur les luminaires peut être extrêmement courte.

Afin de faciliter les opérations de maintenance, de nombreuses tranchées couvertes, de conception déjà ancienne (principalement en région parisienne) ont été pourvues d'une galerie spéciale d'éclairage. Celle-ci nécessite une surlargeur de l'ouvrage ; elle est limitée du côté de la chaussée par une paroi en verre dépoli, les appareils étant fixés sur le piedroit vertical. Entre les appareils (ouverts) et la cloison en verre est réservé un espace permettant l'accès direct à l'installation.

Cette solution apporte indiscutablement des facilités d'entretien considérables, mais elle augmente les dépenses de génie civil, d'équipement et d'exploitation.

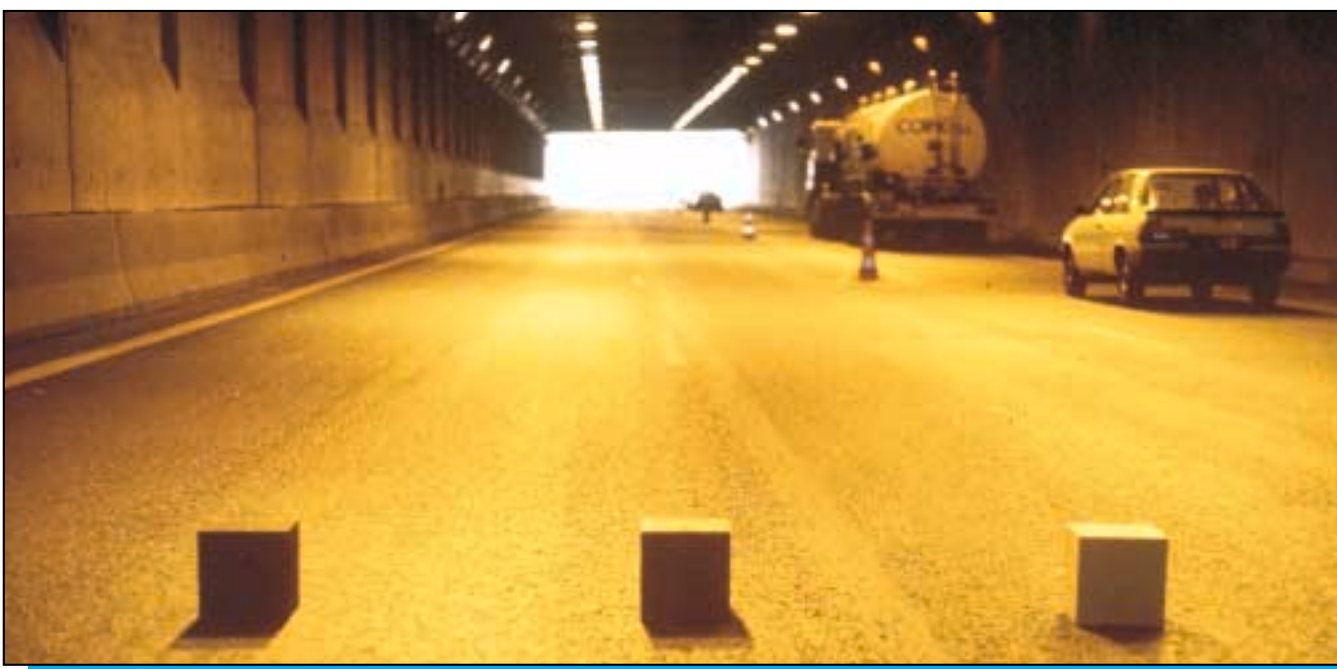
Elle conduit à une puissance installée et à une consommation nettement plus élevées en raison de son rendement plus faible.

Elle est ainsi de plus en plus délaissée.

Une variante plus efficace, mais réservée à des cas d'application très particuliers, consiste à prévoir, sur la face côté circulation d'une galerie latérale, des appareils étanches à flux dirigé de type classique qui éclairent directement la chaussée et les piédroits, et peuvent être basculés dans la galerie pour l'entretien.

5.2.3 - Système à contre-flux

Le système à contre-flux utilise des appareils à flux dirigé d'un type particulier. La distribution de la lumière s'effectue de manière très dissymétrique, à contresens de la circulation automobile.

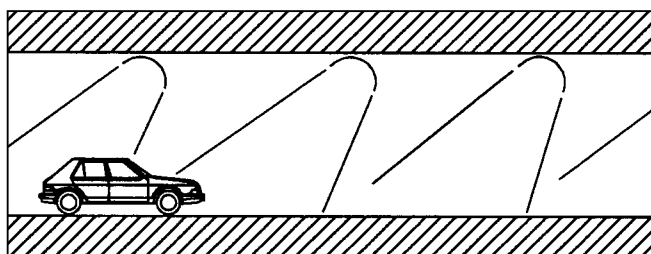


▲ **Photo n° 17 - Eclairage à contre-flux dans la tranchée couverte de Mantes la Ville (Autoroute A 13 - Yvelines)**

Comme cela a été expliqué au chapitre 1, cette disposition permet de mieux faire apparaître les éventuels obstacles sur la chaussée en contraste négatif (ils se détachent en silhouettes sombres sur un fond clair).

En zone d'entrée, on a tout intérêt, lorsque cela est possible, à utiliser ce type d'éclairage dès que la vitesse dépasse 70 km/h. Comme déjà indiqué au § 2.2.3 c'est même le seul système capable de satisfaire aux besoins lorsque la vitesse est élevée (90 ou 110 km/h suivant les conditions d'environnement).

Il faut noter que, si les tunnels unidirectionnels constituent le domaine d'application privilégié de ce type d'éclairage, celui-ci peut également être étendu aux ouvrages bidirectionnels ; l'éclairage, conçu et dimensionné pour le sens entrant, permet alors de satisfaire, suivant le mode "flux dirigé dans le sens de la circulation" évoqué au § 1.5.2, aux besoins bien moindres du sens sortant.



▲ **Schéma n°9 - Principe de l'éclairage à contre-flux**

Ce type d'installation n'est pas compatible avec tous les revêtements de chaussée (cf. chapitre 4). Il est plus délicat à étudier car il nécessite une bonne connaissance des caractéristiques photométriques de la chaussée et des piédroits. Il faut en outre supprimer tout risque d'éblouissement des usagers, ce qui s'obtient relativement facilement avec des appareils bien conçus.

Pour les raisons déjà développées au § 1.5.2, ce système est réservé aux zones d'entrée et n'est donc pas employé en section courante où l'éclairage est réalisé en système symétrique classique. Un éclairage à contre-flux ne permettrait en effet pas d'y réduire les luminances, qui sont déjà des valeurs minimales, l'uniformité longitudinale des luminances serait insuffisante à cause de l'espacement trop important entre les luminaires.

5.3 - Implantation des appareils

5.3.1 - Luminaires à flux dirigé de type symétrique

Le choix de l'implantation des luminaires est très important car il conditionne l'étude photométrique.

Il doit être considéré en même temps que les autres impératifs conduisant à définir la section type du tunnel équipé.

Dans ce qui suit, sont donnés des critères valables dans la grande majorité des ouvrages à équiper, en distinguant deux catégories de sections : les sections voûtées et les profils cadres. En effet, la part de section disponible pour l'installation des équipements peut être très différente dans les deux cas.

Le document "Géométrie" du dossier pilote précise la revanche verticale de protection (0,10 m au minimum) et les revanches latérales (0,25 m au minimum) qu'il faut ménager. Il définit la hauteur libre de l'ouvrage, qui est la somme de la hauteur libre minimale (fixée réglementairement), de la revanche de construction et d'entretien, et de la revanche de protection vis-à-vis des équipements.

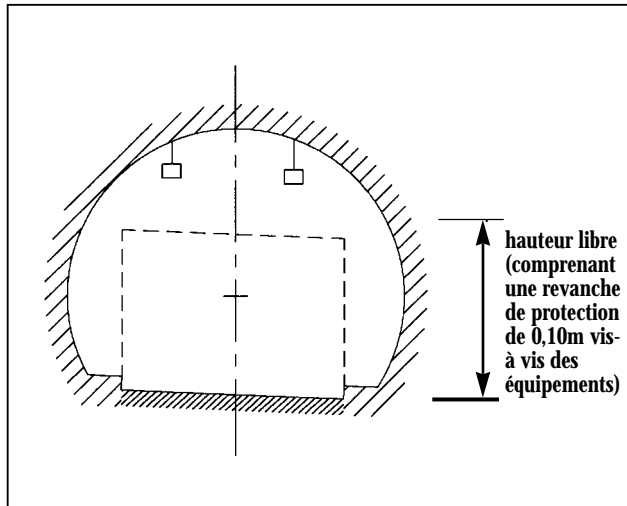


▲ **Photo n°18 - Luminaire au sodium haute pression**

5.3.1.1 - Tunnels à profil voûté

a) Sans gaine de ventilation en plafond

On dispose d'un volume important au-dessus de la hauteur libre. La meilleure implantation est alors au-dessus des voies de circulation comme le montre le schéma n° 10.



▲ **Schéma n°10 - Tunnel voûté : appareils au-dessus des voies de circulation**

Les avantages sont les suivants :

- ◆ Les appareils ainsi disposés présentent le meilleur facteur d'utilisation possible ; en effet le flux peut être distribué de manière symétrique dans le plan transversal de la chaussée : ainsi il est possible d'obtenir une répartition homogène, donc optimisée.



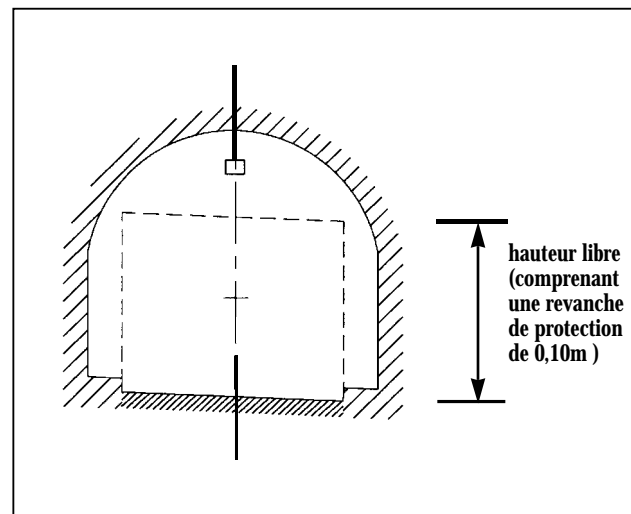
▲ **Photo n°19 - Deux files d'appareils en voûte dans le tunnel du Rosti (Autoroute A 8 - Alpes Maritimes)**

- ◆ L'éblouissement est réduit (par rapport à une implantation latérale) ce qui permet, dans le cas des sources sodium haute pression, un défilement des appareils beaucoup moins sévère et conduit donc à améliorer le rendement.

Ce type d'installation présente toutefois des inconvénients d'ordre pratique :

- franchissement des files lumineuses par certains équipements (accélérateurs, panneaux directionnels)
- nécessité de prévoir dans certains cas une serrurerie importante (pendants de grande longueur) ; celle-ci peut toutefois être réduite en ramenant les appareils contre la paroi en rein de voûte.

Pour des raisons d'économie, lorsque l'ouvrage est étroit et à faible trafic (voir § 1.3), on peut envisager une seule file d'appareils au milieu de la section comme le montre le schéma n°11.



▲ **Schéma n°11 - Tunnel voûté étroit : une seule file d'appareils (la file peut aussi être déplacée latéralement au-dessus de la voie rapide en circulation unidirectionnelle)**

Le principal avantage par rapport à la solution précédente est le coût bien inférieur tant en investissement qu'en exploitation.

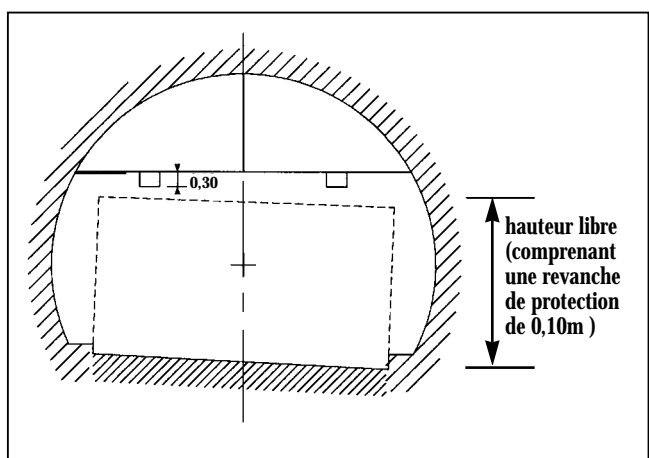


▲ **Photo n°20 - File unique d'appareils dans le tunnel de Noailles (RN 20 - Corrèze)**

L'inconvénient essentiel réside dans l'entretien qui nécessite généralement la fermeture du tube concerné. Si on ne peut pas basculer la circulation sur un autre tube ou sur un itinéraire parallèle, ces difficultés d'exploitation peuvent imposer de décaler latéralement la file d'appareils en allant éventuellement jusqu'à la solution du schéma n°15. Ceci est toutefois déconseillé pour les tunnels bidirectionnels.

b) Avec gaines de ventilation en plafond

Dans les cas où la place disponible au-dessus des voies est suffisante, on se ramène au cas précédent, comme le montre le schéma n°12.

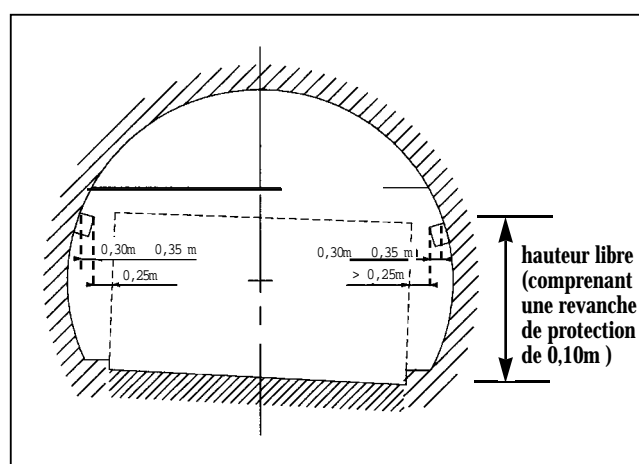


▲ **Schéma n°12 - Tunnel avec faux plafond suffisamment haut : appareils au-dessus des voies de circulation**

Il faut noter l'avantage que présente, pour le logement des appareils, la mise en place de plafonds légèrement voûtés.

Les avantages et inconvénients respectifs des solutions comprenant une file d'appareils au-dessus de chaque voie de circulation ou une seule file centrale sont évidemment les mêmes que lorsqu'il n'y a pas de gaine de ventilation (cf. § a ci-avant).

Dans le cas où la place disponible au-dessus des voies de circulation n'est pas suffisante, on réalise une installation dite latérale, qui nécessite une revanche latérale de protection de 0,25 m. Le schéma n°13 montre une implantation bilatérale.



▲ **Schéma n°13 - Tunnel avec faux plafond : installation bilatérale**

Les avantages essentiels sont alors :

- ◆ un gain sensible sur la section totale du tunnel,
- ◆ un entretien grandement facilité (luminaires plus facilement accessibles, position de travail plus aisée, une seule voie de circulation à neutraliser).

Les inconvénients sont :

- ◆ un facteur d'utilisation moins bon que pour une installation au-dessus des voies,
- ◆ la difficulté de maîtriser l'éblouissement des usagers par les sources sodium haute pression, ce qui peut conduire à équiper les appareils de paralumes conséquents et ainsi à diminuer le rendement de l'installation.

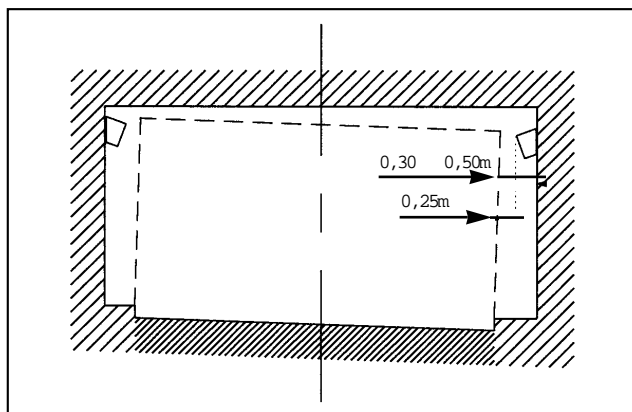


▲ **Photo n°21 - Installation bilatérale dans la tranchée couverte de Bobigny (autoroute A 86 - Seine Saint-Denis)**

5.3.1.2 - Tunnels à profil cadre

Ce cas est proche du précédent, si ce n'est que la hauteur sous plafond est souvent une contrainte plus importante car elle peut conditionner le profil en long de la chaussée. Les solutions sont donc les mêmes que pour un profil voûté avec faux plafond.

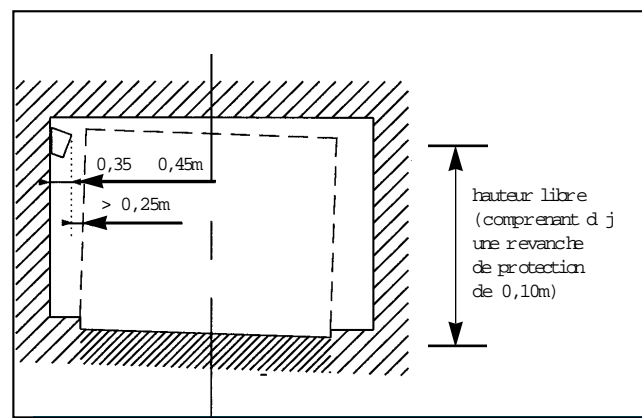
Lorsqu'on ne dispose pas d'une place suffisante au-dessus de la hauteur libre pour installer les luminaires au-dessus des voies de circulation, la solution consiste en une implantation latérale.



▲ **Schéma n°14 - Profil cadre : installation bilatérale**

Le schéma n°14 montre une installation bilatérale. Les avantages et inconvénients engendrés par cette solution sont évidemment les mêmes que ceux mentionnés pour un profil voûté avec gaines de ventilation en plafond. Si la chaussée ne présente pas plus de deux voies, il

est possible d'envisager une implantation unilatérale comme représenté au schéma n°15.

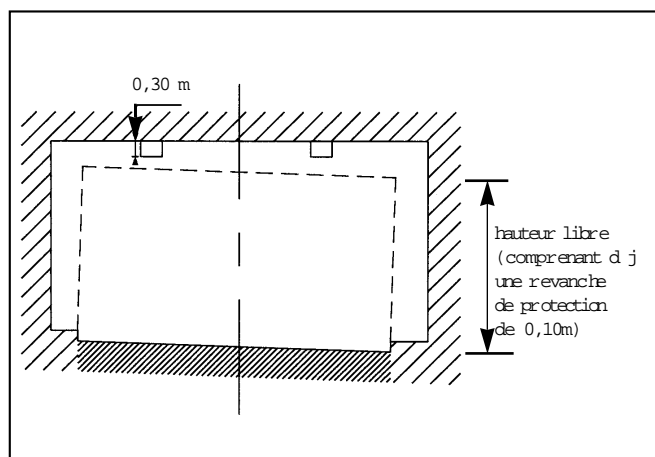


▲ **Schéma n°15 - Profil cadre : installation unilatérale**

Pour les ouvrages unidirectionnels, il est préférable de mettre en œuvre les appareils à gauche, de manière à éviter l'effet de masque engendré par les poids lourds.

L'avantage essentiel sur la solution bilatérale est le coût sensiblement inférieur. Son usage ne peut être étendu à des ouvrages larges en raison de la difficulté à obtenir une uniformité transversale des éclairagements satisfaisante au niveau de la chaussée.

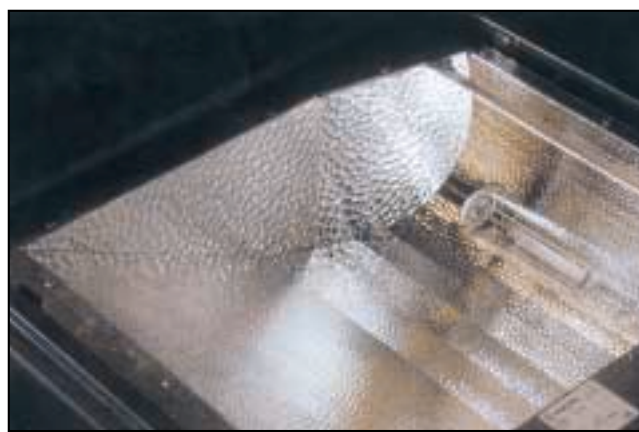
Dans le cas où l'on dispose d'une place suffisante au-dessus des voies de circulation, une implantation en plafond peut être réalisée comme représenté au schéma n°16.



▲ **Schéma n°16 - Profil cadre suffisamment haut : appareils au-dessus des voies de circulation**

5.3.2 - Système à contre-flux

Dans ce système, les appareils sont implantés obligatoirement au-dessus des voies de circulation pour éviter d'éblouir les usagers (schémas types 10, 11, 12, 16) et nécessitent donc que les problèmes d'encombrement soient pris en compte dès le stade de l'étude préliminaire. Le problème est surtout important pour les tunnels cadres (ou assimilés). On peut se baser sur une hauteur maximale de 0,40 m pour les appareils, fixations comprises. Dans les tunnels voûtés sans plafond de circulation, la place disponible est suffisamment importante pour permettre leur implantation sans dispositions ou difficultés particulières.



▲ **Photo n°22 - Luminaire à contre-flux (sodium haute pression)**

5.3.1.3 - Remarque sur le choix d'implantation

Le choix définitif de l'implantation des appareils doit tenir compte aussi des autres équipements à mettre en œuvre à l'intérieur de l'ouvrage et particulièrement de la signalisation (feux d'exploitation et panneaux de signalisation).



▲ **Photo n°23 - Renforcement à contre-flux et éclairage de base symétrique dans le tunnel de la Grand-Mare à Rouen (RN 28 - Seine Maritime)**

5.4 - Qualités requises de l'installation

5.4.1 - Mode de prescription et de contrôle des performances photométriques des installations

Rappelons la démarche retenue en éclairage public extérieur afin d'assurer le respect de l'objectif initial (assurer un niveau de luminance) tout en tenant compte des contraintes pratiques, notamment la difficulté à maîtriser les performances photométriques du revêtement de chaussée :

- cahier des charges rédigé avec des valeurs en luminances,
- réponses à l'appel d'offres en luminances avec calcul et justification de l'éclairement associé en chaque point,
- contractualisation, pour l'offre retenue, des valeurs (niveaux) en éclairage,
- mesures de réception contractuelles sur site en éclairages et, à titre indicatif, en luminances.

La même démarche peut être retenue pour l'éclairage des tunnels routiers dès lors que l'on est en mesure de fixer, dès l'appel d'offres, les caractéristiques photométriques du revêtement de chaussée (voir chapitre 4) et des piédroits (s'ils sont pris en compte). Cette démarche s'impose, en tout état de cause, pour le système à contre-flux ou dans le cas de tunnels présentant des caractéristiques géométriques particulières (tunnels à gabarit réduit, tunnels de grande largeur par exemple), pour lesquels seule la connaissance précise des caractéristiques de l'installation qui sera réalisée permet de calculer les éclairages correspondant aux luminances demandées.

Dans bien des cas en revanche les latitudes restreintes pour l'implantation des files lumineuses conduisent à une variabilité relativement faible du rapport entre luminances et éclairages d'une installation à l'autre, compte tenu des critères de qualité et du type de chaussée fixés par ailleurs. L'appel d'offre relatif à l'éclairage intervient très tôt dans la réalisation de l'ouvrage (un grand nombre d'équipements interdépendants sont mis en œuvre au même moment). Cela conduit à établir directement les prescriptions en éclairages (niveaux et uniformités), les performances prévisibles en luminance (niveaux et uniformités) pouvant alors être demandées dans l'offre à titre indicatif.

Dans tous les cas ce sont les performances en éclairages (niveaux et uniformités) qui seront contractualisées, sur la base des études photométriques produites par l'entreprise.

5.4.2 - Performances

Les qualités fondamentales que doit présenter l'installation sont décrites ci-dessous :

- ◆ **Obtention des niveaux imposés**
- ◆ **Très bon rendement lumineux des sources et appareils**

Le choix des sources est traité au paragraphe 5.5.

- ◆ **Paramètre de qualité de contraste (cas des installations à contre-flux)**

Ce paramètre est défini de la façon suivante :

$$q_c = \frac{L}{E_v}$$

où q_c est le paramètre de qualité de contraste en un point

L la luminance de la chaussée (en cd/m^2) perçue par l'utilisateur regardant ce point d'une distance égale à la distance d'arrêt.

E_v l'éclairement vertical (en lux) au niveau de la chaussée en ce point dans la direction de la circulation, c'est-à-dire l'éclairement mesuré sur une surface verticale perpendiculaire à l'axe du tunnel et orientée vers l'entrée (l'éclairage de section courante étant en service au régime normalement utilisé en même temps que les renforcements).

Le paramètre de qualité de contraste de l'installation Q_c est la moyenne des valeurs q_c obtenues pour tous les points pris en compte pour le palier considéré. Il faut noter que la dispersion sur les valeurs de q_c peut être importante.

Ce rapport Q_c caractérise la plus ou moins bonne aptitude de l'installation à produire un contraste négatif des objets situés sur la chaussée. Il doit être au minimum de 1 pour un système à contre-flux (*).

Cette valeur minimale de 1 doit être obtenue, à la mise en service, sur le premier palier. La valeur de Q_c ne doit en outre pas descendre en dessous de 0,6 sur le dernier palier. Notons que la valeur du paramètre de qualité de contraste de l'installation Q_c mesurée lors des essais sur site est souvent inférieure à celle obtenue lors des études ; en effet l'influence de certains facteurs tels que la spécularité des piédroits ne peut pas être facilement prise en compte dans les études.

Une marge de sécurité importante doit avoir été prise en compte sur la valeur théorique du paramètre de qualité de contraste Q_c résultant des études et exigée du constructeur, ceci afin que la valeur mesurée lors des essais respecte la valeur minimale demandée.

(*) Cette valeur minimale concerne les installations à contre-flux ; le paramètre de qualité de contraste vaut généralement de 0,10 à 0,25 pour une installation symétrique.

Cette marge de sécurité est à apprécier lors de l'établissement du projet.

Les principaux facteurs qui favorisent un paramètre de qualité de contraste élevé sont décrits ci-après :

- l'optique et la salissure des appareils doivent renvoyer le minimum de lumière dans la direction de la circulation (celle-ci augmentant E_v),
- les caractéristiques de réflexion de la chaussée et des piédroits doivent être les plus spéculaires possibles, la diffusion de la lumière dans la direction de la circulation augmentant E_v ,
- l'éclairage de base, de type symétrique, diminue le contraste négatif : il est souhaitable qu'un automate permette de réduire l'éclairage de section courante au minimum sur toute la zone d'entrée lorsque les renforcements sont actifs. Ceci impose de dédoubler le câblage de la section courante pour pouvoir obtenir un régime minimal sur la longueur de renforcement et un autre régime pour le reste du tunnel.

◆ Non éblouissement des usagers

En matière d'éblouissement la C.I.E. a introduit deux définitions :

- l'éblouissement d'inconfort qui exprime une gêne sans nécessairement troubler la vision de l'observateur,
- l'éblouissement perturbateur, que l'on constate par une diminution de la capacité de vision, mais qui n'induit pas forcément une gêne.

Dans le dimensionnement d'une installation d'éclairage de tunnel nous nous intéressons seulement à l'éblouissement perturbateur qui a une influence importante sur la vision des objets et donc d'éventuels obstacles placés sur la chaussée.

En souterrain ce problème se pose en raison de la faible hauteur d'implantation des appareils. Pour des sources très lumineuses, notamment les sources au sodium haute pression à partir de 250 W, il conduit à prévoir un défilement soit par l'implantation de l'appareil, soit par sa conception même. Une implantation en plafond ou en voûte facilite le respect de cette condition.

Avec un système d'éclairage symétrique les dispositions à respecter en termes d'éblouissement sont les suivantes :

- Aucune réflexion spéculaire directe des sources ne doit être visible dans une zone limitée par la chaussée et par un plan incliné à 25° sur l'horizontale, la trace de ce plan étant normale à l'axe de la chaussée. Ce défilement et cette absence de réflexion spéculaire doivent être obtenus pour l'œil de l'observateur situé à 1,50 m au-dessus du plan de la chaussée, sur toute la largeur qui permet l'implantation

des voies de circulation (généralement 6,50 m pour un tube à 2 voies).

- Aucun luminaire visible dans ces zones ne doit avoir une intensité supérieure à 1500 cd dans la direction de l'observateur définie ci-dessus.
- Aucun luminaire visible dans une zone définie comme ci-dessus mais limitée par un plan incliné à 20° ne doit présenter une intensité supérieure à 500 cd.

Dans le cas de système à contre-flux, des dispositions doivent être prises pour se rapprocher au maximum des prescriptions ci-dessus.

On peut aussi définir l'éblouissement en utilisant le TI (Threshold Increment) qui caractérise l'éblouissement perturbateur. Cet indice est calculé en utilisant les formules suivantes :

$$\text{si } L_{ch} \leq 5 \text{ cd/m}^2 \quad \text{TI} = 65 (L_v/L_{ch}^{0.8}) \text{ en } \%$$

$$\text{si } L_{ch} > 5 \text{ cd/m}^2 \quad \text{TI} = 95 (L_v/L_{ch}^{1.05}) \text{ en } \%$$

avec :

L_{ch} : luminance moyenne de la chaussée

L_v : luminance de voile parasite créée par tous les luminaires dans le champ de vision de l'utilisateur jusqu'à 20° au-dessus de l'horizontale et s'étendant sur toute la largeur de l'ouvrage.

Pour un tunnel, quel que soit le système d'éclairage retenu, il est recommandé par les organismes internationaux d'avoir un TI inférieur à 15 %. Cette valeur semble forte et il est préférable de retenir 10 %.

◆ Uniformité des luminances de chaussée

En complément d'une photométrie adaptée des appareils, qui intervient au premier chef, il convient de prévoir une implantation assurant une bonne uniformité des luminances, la vision des obstacles étant nettement améliorée s'ils se détachent sur un fond uni sans zone d'ombre. Le respect de cette condition conduit à prévoir dans l'ouvrage des appareils assez rapprochés, y compris pour les faibles régimes d'utilisation.

Lorsque la consultation est faite sur la base d'un cahier des charges rédigé avec des valeurs de luminances, les critères d'uniformité habituellement retenus sont les suivants :

- l'uniformité générale U_0 qui est le rapport entre la valeur minimale relevée sur la zone de mesure et la moyenne des mesures effectuées sur cette même zone,
- l'uniformité longitudinale qui est le rapport entre la luminance la plus basse et la plus haute mesurées sur un axe longitudinal. La largeur roulable de bord de trottoir à bord de trottoir est divisée en bandes. L'uniformité longitudinale U_L de la zone considérée est la valeur la plus faible obtenue sur les axes longitudinaux de chaque bande de mesure.

Les valeurs conseillées sont les suivantes (*) :

	plein régime	régime minimal (**)
Uniformité générale	$\geq 0,5$	$\geq 0,4$
Uniformité longitudinale	$\geq 0,8$	$\geq 0,65$

Les valeurs d'uniformité recommandées ci-dessus s'appliquent aux installations pour lesquelles les différents régimes de fonctionnement sont obtenus par mise en service (ou hors service) d'un nombre plus ou moins grand de sources. Lorsque l'obtention des différents régimes se fait par variation (continue ou discontinue) du flux des sources, on pourra retenir les valeurs recommandées pour le régime maximal, légèrement minorées (de 0,05 par exemple).

◆ Uniformité des éclairements

Lorsque la consultation est faite sur la base des éclairements, les critères d'uniformité habituellement retenus sont les suivants (on ne peut pas imposer simultanément des uniformités d'éclairement et de luminance) :

- l'uniformité transversale U_t qui est le rapport entre la valeur minimale relevée sur un axe transversal et la moyenne des mesures effectuées sur cet axe,
- l'uniformité longitudinale U_l qui est le rapport entre l'éclairement le plus bas et le plus haut mesurés sur un axe longitudinal. La largeur roulable de bord de trottoir à bord de trottoir est divisée en bandes (U_l est propre à chaque bande).

L'uniformité longitudinale U_l de la zone considérée est la valeur la plus faible obtenue sur les axes longitudinaux de chaque bande de mesure.

Pour l'application des dispositions ci-après, on considèrera comme à faible trafic les tunnels dont le trafic répond aux critères définis dans le § 1.3.

(*) Pour la vérification de ces critères l'observateur est fixe, il est positionné à une distance de 60 m de la zone de mesure et ses yeux sont placés à une hauteur de 1,5 m de la chaussée. Dans le sens transversal on procède de la manière suivante :

- pour le calcul de la luminance moyenne et de l'uniformité générale, l'observateur est situé au quart de la largeur de la zone de calcul (du côté opposé aux foyers lorsque l'installation est unilatérale), pour le calcul de l'uniformité longitudinale, il est situé sur l'axe de chaque voie de circulation

(**) le régime minimal n'est pas forcément le régime de sécurité (voir § 1.4)

Les valeurs conseillées sont les suivantes :

	plein régime	régime minimal (**)
Uniformité transversale	$\geq 0,7$ (0,6 pour les tunnels à faible trafic)	$\geq 0,5$
Uniformité longitudinale	$\geq 0,75$ (0,7 pour les tunnels à faible trafic)	$\geq 0,6$

Les valeurs d'uniformité recommandées ci-dessus s'appliquent aux installations pour lesquelles les différents régimes de fonctionnement sont obtenus par mise en service (ou hors service) d'un nombre plus ou moins grand de sources. Lorsque l'obtention des différents régimes se fait par variation (continue ou discontinue) du flux des sources, on pourra retenir les valeurs recommandées pour le régime maximal, légèrement minorées (de 0,05 par exemple).

◆ Eclairage vertical sur les piédroits

Pour assurer à l'usager un bon repérage du volume du tunnel et lui permettre de bien délimiter l'espace de circulation et les parois verticales, il est nécessaire d'éclairer suffisamment ces dernières.

Dans ce but le niveau d'éclairage vertical dans le plan des piédroits, à 1 m au-dessus du niveau de la chaussée, est mesuré sur chaque axe transversal de la zone de mesure.

Le rapport, défini pour chaque axe transversal de la zone de mesure, entre l'éclairage vertical de chaque piédroit et la moyenne des mesures effectuées sur la chaussée ne doit pas être inférieur à 0,4.

◆ Etanchéité des appareils

L'étanchéité à l'eau et aux poussières est absolument nécessaire pour assurer la conservation des qualités tant mécaniques qu'optiques des appareils. On retient habituellement un indice de protection IP 65 suivant la norme NFC 20 010 (NF EN 60 529). Cet indice doit être conservé dans le temps. Il n'est pas souhaitable d'aller au-delà à cause de l'élévation excessive de température qui pourrait survenir avec un appareil trop "étanche" et aussi à cause du coût qui augmente rapidement lorsque l'indice IP dépasse la valeur 65. Il faut souligner que cet indice ne garantit pas forcément l'étanchéité lors du lavage au jet sous pression des parois, ce qui doit conduire à prendre des précautions lors de ces opérations.

◆ Facilité d'entretien

L'entretien de l'éclairage représente une sujétion très lourde tant par le nombre d'heures qu'il nécessite annuellement que par la fréquence des interventions. Celles-ci sont rendues très difficiles par la circulation et engagent la sécurité des usagers et du personnel. Il convient, dès les études préliminaires, de prendre toutes les dispositions permettant de le faciliter.

Quelles qu'en soient les modalités, l'entretien en tunnel n'est possible, hormis le cas des galeries spéciales d'éclairage, qu'au moyen d'un engin à plate-forme permettant un accès direct. Il importe que cet engin apporte le minimum de gêne à la circulation : les files d'appareils doivent être implantées en conséquence.

◆ Pérennité des installations

Il faut veiller tout particulièrement à la protection des luminaires vis-à-vis de l'ambiance très corrosive qui règne dans un ouvrage souterrain et souligner que la corrosion, qui dépend de très nombreux facteurs, peut varier fortement d'un tunnel à l'autre. Des données sur ce sujet sont disponibles au CETU.

5.5 - Sources lumineuses

5.5.1 - Qualités demandées

Les sources doivent être adaptées :

- à une uniformité satisfaisante des luminances,
- au niveau recherché, les sources étant d'autant plus puissantes que celui-ci est élevé, dans le but de limiter leur nombre sans pour autant compromettre l'uniformité, notamment aux faibles régimes,
- aux possibilités d'implantation des appareils qui conditionnent leur photométrie,
- à la possibilité de réallumage de la source en cas de coupure fugitive de l'alimentation électrique,
- aux conditions d'utilisation en tunnel (entretien difficile et coûteux ; durée annuelle d'utilisation très importante de l'ordre de 6 000 à 8 000 heures en section courante et de quelques centaines à quelques milliers d'heures pour les renforcements),
- à la nécessité d'économiser l'énergie consommée (bon rapport lumens/watt),
- le cas échéant aux conditions de température propres à l'ouvrage.

Ces considérations conduisent à retenir en pratique les tubes fluorescents tubulaires (diamètre 26 mm) et

compacts, ainsi que les lampes à vapeur de sodium, basse ou haute pression.

A noter qu'il existe des lampes à induction et des tubes fluorescents de diamètre 16 mm qui satisfont aux contraintes exposées mais dont l'usage en tunnel n'est pas encore généralisé en 2000. Quelques tunnels en Suisse ont été équipés avec des lampes à induction mais ces installations sont récentes (moins de 5 ans) et il n'est pas encore possible d'en tirer des enseignements en termes de pérennité et de bilan économique.

5.5.2 - Choix des sources

D'une manière très générale, le tube fluorescent convient bien à la section courante pour des raisons de gamme de puissance, de confort visuel et de rendu des couleurs. Les sources sodium basse pression ont un meilleur rendement énergétique, mais donnent une couleur jaune monochrome peu agréable et nécessitent des appareils volumineux ; elles sont de moins en moins utilisées. On peut également envisager un mélange de ces deux types de sources. Pour les ouvrages urbains à fort niveau d'éclairement en section courante ou pour les tunnels de grande largeur, l'emploi de sources sodium haute pression de faible puissance est également possible. Malgré une gamme assez restreinte les lampes à induction doivent pouvoir, dans certains cas, être utilisées en section courante ; leur efficacité lumineuse assez moyenne est compensée par une durée de vie environ 5 fois supérieure à celle des autres sources.

En zone de renforcement, afin de limiter le nombre d'appareils, on utilise, soit les lampes à vapeur de sodium basse pression, malgré leur monochromatisme (peu gênant dans les ouvrages où les piétons ne sont pas admis ou dans les ouvrages interurbains), soit les lampes à vapeur de sodium haute pression dont les effets d'éblouissement doivent être réduits au maximum par un défilement. Ces deuxièmes sources nécessitent des appareils nettement moins volumineux que les premières, de moins en moins utilisées.

Les tableaux ci-après indiquent les principales sources dont l'emploi est actuellement possible en tunnel et leurs caractéristiques techniques.

a) Tubes fluorescents tubulaires en diamètre 26 mm et compacts (caractéristiques moyennes)

	Puissance nominale de la source (W)	indice de rendu des couleurs	Flux lumineux à 100 h (lm)	Longueur (mm)	Luminance maximale de la source (cd/cm ²)	Puissance appareillage (W)	Puissance totale (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
blanc industrie Ø 26 mm	36	55	3 000	1 200	0,95	10	46	65
	58	55	4 600	1 500	1,25	10	68	67
gamme chromatique Ø 26 mm	36	85	3 350	1 200	1,15	10	46	73
	58	85	5 200	1 500	1,40	10	68	76
gamme haute fréquence Ø 26 mm	32	85	3 200	1 200		4	36	89
	50	85	5 000	1 500		6	56	89
gamme compact avec ballast électronique (*)	32	85	2 900	410		4	36	80
	40	85	3 500	535		5	45	78
	52	85	4 800	535		6	58	82

b) Lampes à vapeur de sodium haute pression tubulaires claires (caractéristiques moyennes)

Puissance nominale de la source (W)	Flux lumineux à 100 h (lm)	Longueur (mm)	Luminance moyenne de la source (cd/cm ²)	Puissance moyenne appareillage (W)	Puissance totale moyenne (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
70	6 600	159	300	15	85	78
100	10 500	211	300	11 à 16	116	90
150	16 500	211	340	17	167	99
250	28 000	257	360	25	275	102
250 +	32 000	257	420	25	275	116
400 +	55 500	283	630	30	430	129

(*)La gamme "compact" peut fonctionner avec des ballasts électroniques normaux ou avec des ballasts électroniques Haute Fréquence (HF) avec des flux identiques. Toutefois, avec des ballasts HF, les sources "compact" peuvent fonctionner à une puissance inférieure à la puissance nominale (32 à 34 W pour une source 40 W et 50 à 52 W pour une source 55 W), et les flux lumineux sont alors diminués de l'ordre de 10 %.

c) Lampes à vapeur de sodium basse pression (caractéristiques moyennes)

Puissance nominale de la source (W)	Flux lumineux à 100 h (lm)	Longueur (mm)	Luminance moyenne de la source (cd/cm ²)	Puissance moyenne appareillage (W)		Puissance totale moyenne (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
				Classique	Hybride		
26	3 700	310	8	9		35	106
36	6 150	425	8		11	47	131
66	10 600	528	8		16	82	130
91	17 000	775	8		16	107	159
131	26 000	1 120	8		20	151	172

d) Lampes à induction (caractéristiques moyennes)

Puissance nominale du système lampe (W)	Flux lumineux à 100 h (lm)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
55	3 500	141	85	64
85	6 000	181	111	71
165	12 000	215	130	73

e) Tubes fluorescents en diamètre 16 mm (caractéristiques moyennes)

Puissance nominale de la source (W)	Indice de rendu des couleurs	Flux lumineux à 100 h (lm)	Longueur (mm)	Puissance ballast électronique (W)	Puissance totale (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
21	85	2 100	863	4	25	84
28	85	2 900	1 163	4	32	90
35	85	3 650	1 463	4	39	93

Il est important de noter que les tubes fluorescents du type "haute fréquence" ou "compact avec ballast électronique", de même que les lampes à vapeur de sodium haute pression peuvent être utilisés avec des dispositifs permettant de

faire varier leur flux lumineux de manière soit continue, soit discontinue. Cette caractéristique peut être utilement mise à profit pour la réalisation des différents régimes de fonctionnement.

5.6 - Luminaires

5.6.1 - Rappel des contraintes liées à l'utilisation

Les luminaires utilisés dans les tunnels sont soumis à des conditions particulières d'utilisation et doivent répondre à des caractéristiques mécaniques et photométriques très spécifiques.

Environnement

L'ambiance d'un tunnel routier est particulièrement sévère. Il faut tout particulièrement tenir compte des points suivants :

- les conditions de température ambiante (en général de - 5° à + 30° en France),
- l'encrassement toujours très important dû à la circulation,
- la corrosion due à l'humidité et aux gaz d'échappement des véhicules.

Exploitation

L'entretien a une importance capitale pour garantir les performances photométriques et donc la sécurité. La conception mécanique des luminaires et des fixations doit faciliter les opérations de pose, dépose et réglage d'inclinaison.

Les travaux d'entretien comprennent le nettoyage extérieur des faces avant des luminaires, le changement de lampes, les réparations électriques d'appareils en panne. Ils doivent se faire dans des temps très courts car il est pénible pour les équipes d'entretien de séjourner dans les tunnels. De plus l'arrêt ou la modification du trafic sont soit impossibles, soit très limités pour ne pas perturber la sécurité des usagers.

Les tunnels sont éclairés 24 heures sur 24. Le matériel doit répondre à ce régime intensif de fonctionnement (durée de vie des lampes et auxiliaires, régime thermique de l'appareil, étanchéité).

Photométrie

Les sources utilisées sont soit linéaires (tubes fluorescents et sodium basse pression), soit tubulaires (sodium haute pression).

Les hauteurs de feu sont faibles, de l'ordre de 4 à 6 m. Les largeurs éclairées sont importantes par rapport à la hauteur des luminaires.

Les implantations sont soit sur piédroits (unilatérales ou bilatérales), soit axiales (axe du tunnel ou axe de voie de circulation) et doivent se faire en dehors du gabarit routier comprenant la revanche de protection.

Toutes ces conditions conduisent à utiliser des optiques spécifiques dont la répartition photométrique doit être adaptée aux paramètres de l'installation.

En règle générale les optiques nécessaires sont inscrites dans un parallépipède rectangle dont les dimensions sont de l'ordre de 250 mm de largeur et de 200 mm de profondeur. La longueur est très variable en fonction du type et du nombre de lampes utilisés par optique. Elle est comprise entre 0,40 m et 1,70 m le plus souvent.

Les systèmes optiques doivent limiter l'éblouissement dû aux sources. Aucune précaution n'est généralement nécessaire avec les tubes fluorescents ou les lampes sodium basse pression. Par contre avec les lampes sodium haute pression de 250 et 400 W, il est pratiquement obligatoire d'utiliser, entre la glace et le miroir, une grille de défilement dont la définition est fonction des intensités lumineuses acceptables en direction de l'œil des conducteurs.

Installation

Les luminaires en tunnel sont placés en ligne le plus souvent discontinue, ce qui permet de réduire le nombre d'appareils installés (pour des raisons d'économie).

Leur système de fixation doit permettre le montage et le démontage rapide de chaque appareil compte tenu de la liaison électrique extérieure à l'appareil. La fixation réglable doit assurer parfaitement l'alignement et l'orientation des caissons d'éclairage malgré les écarts du génie civil.

Les suspensions doivent être étudiées en tenant compte de l'existence des chemins de câbles et des boîtes de dérivation.

5.6.2 - Constitution des luminaires

Les luminaires sont généralement constitués d'un caisson hermétique qui est tenu par un système de fixation et d'orientation et qui contient le système optique et le bloc électrique d'alimentation.

Réalisé en matériaux très résistants et difficilement corrodables, le caisson doit être très rigide pour favoriser l'étanchéité, la mise en œuvre et l'exploitation. Son ouverture peut se faire soit latéralement (ouverture des flasques), soit en face avant (ouverture de la glace). Il est équipé d'une glace en verre trempé à haute résistance thermique et mécanique (indice de choc 5 suivant la norme NFC 20.010).

Le caisson peut recevoir un ou plusieurs blocs optiques. Un bloc optique est constitué d'un miroir et du système de fixation du support douille. Sa forme et ses dimensions sont fonction du type de lampe utilisé et de la photométrie à réaliser. Les optiques sont étudiées pour produire une bonne répartition longitudinale et transversale avec un bon rendement lumineux.

Les luminaires doivent être conformes aux normes en vigueur et notamment :

- NF C 20-010 : "Degrés de protection procurés (NF EN 60529) par les enveloppes"
- NF C 63-300 : "Prises de courant pour (NF EN 60309-1) usages industriels"
- NF C 71-000 : "Luminaires - partie 1 : (NF EN 60598-1) Prescriptions générales et essais"
- NF C 71-003 : "Luminaires - partie 2 : (NF EN 60598-2-3) Règles particulières - Section 3 : "Luminaires d'éclairage public"

Nota : Dans le cadre du Comité Electrotechnique International (C.E.I.), les luminaires de tunnels sont considérés comme devant relever de la norme NF EN 60598-2-3 (réunion de Munich du 10/05/1992).

5.7 - Conduite du projet

5.7.1 - Choix de base - Conception générale

5.7.1.1 - Objet

Cette étape du projet a pour but de fixer les choix fondamentaux relatifs à l'éclairage en fonction de l'environnement et des caractéristiques de l'ouvrage.

5.7.1.2 - Choix fondamentaux

Le projeteur doit connaître les données concernant le trafic, la catégorie de l'itinéraire, la longueur de l'ouvrage, la vitesse à l'intérieur du tunnel et aux approches.

Si la décision d'éclairer est retenue, il est nécessaire d'estimer les conditions d'environnement photométrique des entrées et de décider de la vitesse de référence et du système d'éclairage.

Ces choix étant fixés, il est possible d'appliquer la méthodologie à laquelle il est fait référence au § 2.2. On obtient une courbe donnant la luminance nécessaire le long de l'ouvrage, dont la précision est évidemment liée au degré de connaissance des différentes luminances de voiles parasites prises en compte. Cette courbe doit être traduite en niveaux d'éclairage afin de fixer une première estimation du coût. Pour la suite des études, les luminances de voile ainsi que l'opacité maximale prévisible dans l'ouvrage

devront être précisées afin de donner, avec une meilleure précision, les luminances requises.

Il faut réserver dans le génie civil la place nécessaire à l'implantation de l'installation d'éclairage.

5.7.1.3 - Niveaux d'éclairage

Niveau de section courante

Le tableau du § 4.3.1 rappelle certaines des valeurs de luminance de section courante données au § 2.1 et indique les éclairagements correspondants selon le type de revêtement de chaussée. Il utilise la loi de Lambert "généralisée" décrite au § 4.2 :

$$E = L \frac{\pi}{c}$$

qui donne l'éclairage E moyen (en lux) en fonction :

- de la luminance L moyenne (en cd/m²) à obtenir,
- du "coefficient de clarté" c de la chaussée.

Si, au niveau de l'étude préliminaire, on ne connaît pas la couche de roulement qui sera réalisée, on peut utiliser un coefficient de clarté moyen de l'ordre de 0,15 à 0,18. La valeur devra être précisée lors de l'avant projet d'ouvrage d'art (autoroutes) ou du projet d'ouvrage d'art (autres cas).

Niveaux de renforcement

Au niveau de l'étude préliminaire, les niveaux d'éclairage sont directement déduits de la courbe de luminance nécessaire en utilisant les mêmes hypothèses sur la valeur du coefficient de clarté que pour la section courante. Il en est de même pour les renforcements éventuels de sortie.

5.7.2 - Projet détaillé

5.7.2.1 - Objet

Cette phase précède l'établissement du dossier de consultation des entreprises. Elle doit comporter toutes les études particulières nécessaires à l'établissement de l'estimation détaillée. Dans certains cas, ce projet détaillé peut être conduit au niveau du projet d'ouvrage d'art ou avant projet d'ouvrage d'art et c'est la raison pour laquelle il est présenté ici.

Il s'agit de fixer précisément la répartition des appareils correspondant aux différents niveaux d'éclairage et aux régimes de marche, de faire le bilan des puissances nécessaires, de préciser l'alimentation électrique et le câblage, puis d'en déduire l'estimation détaillée de l'investissement et le coût d'exploitation.

Les principaux points étudiés sont précisés ci-après.

5.7.2.2. - Présentation des études à effectuer

A ce stade du projet, on dispose déjà d'une première courbe donnant la luminance nécessaire le long de l'ouvrage. Celle-ci a été estimée en fonction des paramètres rappelés au § 5.7.1.2. Il s'agit alors d'affiner les données afin d'établir la courbe définitive.

Les caractéristiques photométriques de la chaussée doivent être connues afin de passer des luminances aux éclairagements.

On détermine ensuite les différents régimes et on procède à la répartition des appareils en fonction des impératifs liés aux niveaux à réaliser, aux sources disponibles sur le marché, à l'uniformité nécessaire sur la chaussée, etc. Dans cette démarche l'option de sources à flux variable ou de luminaires multisources, permettant de réaliser les régimes à l'aide des mêmes appareils, revêt une importance particulière.

La suite de l'étude consiste à :

- choisir le mode de fixation des appareils,
- calculer les puissances nécessaires en situation normale et en secours,
- décider des dispositifs d'alimentation et de commande,
- rappeler, ou préciser si besoin est, les réservations de génie civil.

5.7.2.3 - Détermination des paliers de renforcement et des longueurs d'application

Il faut définir le plus précisément possible les paramètres suivants :

- luminance de voile de Fry (L_{Fry})
- luminance de voile atmosphérique (L_{atm})
- luminance de voile de pare-brise (L_{pb})
- vitesse de référence
- système d'éclairage
- opacité moyenne prévue en tunnel.

Le projecteur doit disposer de suffisamment de campagnes de mesures sur le site et/ou de résultats de simulations numériques pour choisir les luminances de voiles parasites L_{Fry} , L_{atm} , L_{pb} à prendre en compte dans son calcul de la luminance nécessaire.

Pour des raisons pratiques, on réalise rarement un éclairage décroissant de manière continue jusqu'à la valeur de section courante. A partir de la courbe donnant la luminance nécessaire le long de l'ouvrage, on trace des paliers qui doivent être au-dessus des valeurs calculées : celles-ci sont des minima en fonction des conditions données. Dans la pratique on limite le nombre de paliers à quatre ou cinq pour faciliter la réalisation. Le niveau d'un palier ne doit pas être inférieur à la moitié (exceptionnellement au tiers) du précédent. En raison de la pénétration de la lumière naturelle dans l'ouvrage, on ne renforce pas l'éclairage des premiers mètres, jusqu'à une distance égale à la plus grande diagonale du profil en travers intérieur du tunnel.

Le passage de la luminance aux éclairagements se fait comme indiqué au chapitre 4.

Le schéma n°17 montre un exemple de paliers à réaliser ainsi que le passage des luminances aux éclairagements dans la zone d'entrée.

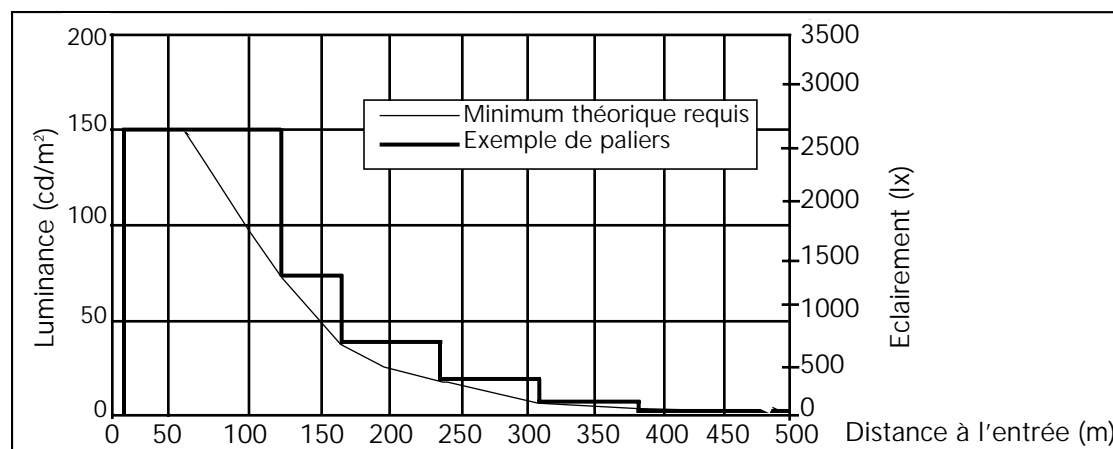
5.7.2.4 - Détermination des régimes de fonctionnement

Les paliers déterminés précédemment correspondent au régime maximal d'éclairage. Il faut que l'installation et en particulier la répartition des appareils soit conçue pour assurer également les régimes intermédiaires.

Régimes de renforcement d'entrée

On prévoit plusieurs régimes à utiliser en fonction de l'éclairage naturel à l'extérieur, au minimum :

- un régime plein soleil correspondant au niveau maximal installé,
- un régime jour couvert,
- un régime nuit où tous les circuits de renforcement sont éteints.



▲ **Schéma n°17 - Exemple de paliers de renforcement (c = 0,18)**

Dans les cas où le niveau maximal installé R est très élevé, il peut être intéressant d'ajouter un régime supplémentaire dit de crépuscule; la répartition des niveaux peut être par exemple : R pour le régime plein soleil, 2R/3 pour le régime jour couvert et R/3 pour le régime crépuscule.

Régime de renforcement de sortie

En règle générale, on ne prévoit que le régime maximal et l'extinction.

Régime de section courante

Plusieurs régimes sont prévus, à appliquer en fonction de l'éclairage naturel extérieur, de l'heure de la journée, parfois même de l'intensité du trafic. Le cas le plus fréquent est le suivant :

- régime normal correspondant au niveau maximal installé B,
- régime nuit correspondant à B/2 ou 2B/3,
- régime nuit réduit correspondant à B/4 ou B/3.

Régime de l'éclairage de sécurité

Lorsqu'un éclairage de sécurité est nécessaire (voir § 1.4) celui-ci assure souvent un éclairage égal au minimum à B/8, et généralement à B/4. Il doit de toute façon rester supérieur à 10 lux en moyenne et à 2 lux au minimum en tout point de la chaussée et des trottoirs. Le circuit de sécurité doit être secouru (voir § 6.2).

5.7.2.5 - Détermination du flux lumineux nécessaire

A partir des éclairages déterminés précédemment, on calcule le flux correspondant en employant la formule générale :

$$E = \frac{\Phi U M}{W L}$$

avec :

E : niveau d'éclairage requis, en lux,
Φ : flux nécessaire correspondant, en lumens,
U : facteur d'utilisation : rapport du flux utile reçu par la chaussée au flux émis par les lampes. Il dépend de la conception des luminaires, du type de source utilisée et de la position des luminaires par rapport aux parois.
Une étude faite à partir d'installations réelles conduit aux fourchettes suivantes :

- pour les tubes fluorescents : 0,40 à 0,52,
- pour les sources sodium basse pression : 0,45 à 0,50, pour les sources sodium haute pression (appareils équipés de paralumes afin de limiter l'éblouissement) : 0,40 à 0,52. La présence des paralumes disperse les résultats.

M : facteur de maintenance comme défini au § 2.4,
W : largeur roulable à éclairer en mètres,
L : longueur en mètres de la zone correspondant au niveau d'éclairage E.

Cette méthode simplifiée est suffisante au niveau du projet détaillé ; les constructeurs d'éclairage ont, pour répondre aux appels d'offres, des moyens plus sophistiqués faisant intervenir les caractéristiques photométriques et géométriques de leurs matériels.

Le projecteur dispose ainsi du flux nécessaire sur l'ensemble de la longueur de chaque zone d'éclairage. Il peut alors effectuer la répartition des sources et des appareils.

5.7.2.6 - Répartition des appareils

Quoique très simple en théorie, cette phase de l'étude est celle qui demande le plus d'expérience, car pour chaque zone, il faut répartir les appareils pour assurer l'éclairage retenu avec une uniformité correcte sur la chaussée. Cette opération doit tenir compte des caractéristiques des lampes existant sur le marché et des différents régimes qui sont à réaliser, tout en veillant à l'économie générale du projet, c'est-à-dire en prévoyant le nombre minimal d'appareils.

La distance entre appareils peut être liée au projet de ventilation si des bouches d'air frais à jet pariétal sont placées en haut des piédroits, au niveau de la ligne d'éclairage.

Il n'est guère possible de donner une méthode rigoureuse pour cette partie de l'étude ; il est utile cependant de préciser un certain nombre d'impératifs et de principes.

Impératifs à respecter

a) Régimes à réaliser : cf. 5.7.2.4 ci-avant.

b) Uniformité

Comme on l'a vu au § 5.4, il est nécessaire de prévoir des uniformités longitudinales et transversales suffisantes ; le projecteur ne dispose en général pas des éléments permettant de prédéterminer ces uniformités lors du choix de la répartition des appareils, mais il est bien évident que plus les appareils seront espacés, plus l'uniformité longitudinale sera difficile à atteindre par les constructeurs; en pratique une répartition conduisant à un espacement des appareils égal ou supérieur à 9 m au régime maximal est à déconseiller fortement.

c) Sources disponibles sur le marché

Les tableaux du § 5.5.2 donnent une liste des sources disponibles actuellement sur le marché, pour les trois types retenus pour les tunnels ; cet éventail, bien que très large, n'est pas illimité et la répartition des appareils doit en tenir compte.

d) Economie générale du projet

On cherche à réduire le nombre d'appareils au minimum compatible avec les autres impératifs, une bonne part des coûts d'investissement étant présentée par la partie mécanique des appareils et leurs dispositifs d'accrochage.

Principes d'établissement de la répartition des appareils

a) Type de répartition

Il convient au départ des études de choisir entre les deux grands types de répartition de section courante :

- file ininterrompue de luminaires longitudinaux,
- file discontinue.

Le choix dépend évidemment du niveau à réaliser, mais dans le cas général, la file ininterrompue doit être considérée comme luxueuse et ne répondant pas à un souci d'ordre fonctionnel (*) : elle est d'ailleurs de moins en moins utilisée. Par conséquent elle ne peut être choisie que dans le cas de tunnels urbains à fort trafic, pour des raisons tenant au confort et au niveau d'éclairage important à obtenir, alors que la file discontinue constitue le cas général. Le choix entre ces deux solutions dépend bien sûr du nombre de files d'appareils.

On notera que le choix d'une file ininterrompue doit logiquement s'accompagner du choix de systèmes permettant de conserver la file continue aux faibles régimes, à moins qu'il n'y ait au moins deux files de lampes, auquel cas on peut éteindre complètement une file sans nuire à l'aspect général.

b) Nombre de files d'appareils

Le nombre de files d'appareils peut varier de 1 à 3 en fonction du niveau à obtenir et de la largeur à éclairer, fonction elle-même du nombre de voies.

En règle générale, on dispose (cf. § 5.3) :

- une file dans les ouvrages à faible niveau de section courante (en montagne ou en rase campagne) et dans certains ouvrages urbains (par exemple en courbe, une file unique est implantée en haut de piédroit à l'intérieur du virage pour ne pas éblouir les usagers),
- deux files dans les cas courants d'ouvrages de deux à quatre voies de circulation, quel que soit le niveau maximal à installer,
- exceptionnellement trois files pour les ouvrages très larges ou qui nécessitent un niveau important en section courante.

c) Longueur unitaire des appareils

L'encombrement des appareils est fonction des types de lampes. Le choix définitif peut n'être fait qu'au niveau de la rédaction du marché ; au niveau des études de projet d'ouvrage d'art, on peut retenir les longueurs données dans le tableau ci-après. Si l'encombrement est critique, le projeteur doit vérifier les cotes réelles sur les catalogues des différents constructeurs.

Longueurs des appareils les plus courants

Source	Longueur moyenne (m)
Fluo Compact 36 W ou 40 W	0,40 à 0,60
Fluo Compact 2 x 40 W ou 2 x 55 W	0,40 à 0,60
Fluo tubulaire 40 W ou 36 W	1,30 à 1,50
Fluo tubulaire 65 W ou 58 W	1,60 à 1,85
Na BP 35 W ou 26 W	0,55 à 0,95
Na BP 55 W ou 36 W	0,65 à 0,95
Na BP 90 W ou 66 W	0,75 à 0,95
Na BP 135 W ou 91 W	1,10 à 1,75
Na BP 180 W ou 131 W	1,35 à 1,75
Na BP 2 x 35 W	1,35 à 1,75
Na BP 2 x 55 W	1,35 à 1,75
Na BP 2 x 90 W	1,65 à 1,75
Na BP 2 x 135 W	1,65 à 1,75
Na HP 70, 100, 150 ou 250 W	0,50 à 0,90
Na HP 400 W	0,80 à 1,05
Na HP doubles (de 70 à 400 W)	1,50 à 1,75

d) Système d'ouverture des appareils

Deux systèmes d'ouverture des luminaires sont possibles : soit par la face avant, soit latéralement par les flasques d'extrémités.

Le choix entre ces deux types est à effectuer au niveau de l'appel d'offres, en fonction du niveau de maintenance et en liaison avec l'examen du système de fixation.

e) Règles pratiques

En pratique, le projeteur doit également tenir compte des règles de détail suivantes :

- Le nombre de types de sources et d'appareils doit être le plus réduit possible ; on se limite généralement à trois ou quatre types, afin de faciliter l'exploitation et de diminuer le stock de rechange.
- Afin d'équilibrer le temps de fonctionnement des sources, on prévoit lorsque la solution retenue le permet, un système, de préférence automatique, permettant de commuter les circuits de l'éclairage. Il faut toutefois noter qu'en ce qui concerne l'éclairage de section courante, l'installation dite de sécurité reste toujours en fonctionnement et n'est généralement pas commutable sur un autre circuit.

(*) Le papillotement est dû aux sauts de luminance causés par la vision des sources lumineuses ou de leurs images sur le capot du véhicule ou sur l'arrière des véhicules précédents. La gêne due à ce phénomène est difficile à quantifier. Elle dépend notamment de la fréquence et de l'amplitude des sauts de luminance, de la luminance moyenne de l'ambiance, de la longueur des sources par rapport à leur espacement et de la durée totale de l'exposition au phénomène. Des études réalisées sur ce sujet ont montré que les fréquences comprises entre 2,5 et 13 hertz avaient un effet gênant sur les usagers, le maximum du désagrément se situant à une valeur voisine de 7 hertz. En pratique, en raison de l'économie générale du projet et des uniformités d'éclairage demandées, il est très difficile de se placer en dehors de la gamme des fréquences gênantes : la limite basse correspond pour les vitesses usuelles à un espacement des appareils supérieur à 10 m, généralement incompatible avec l'uniformité longitudinale requise, et la limite haute imposerait une file continue d'appareils qui n'est pas concurrentielle sur le plan économique. L'expérience de très nombreuses installations permet de dire qu'une gêne réelle des usagers liée à ce phénomène de papillotement n'a jamais été mise en évidence.

Alimentation électrique et commande

Outre les luminaires proprement dits installés en tunnel, l'éclairage nécessite une alimentation en énergie électrique et un système de commande adaptés.

6.1 - Distribution électrique

6.1.1 - Principes

L'alimentation électrique des sources lumineuses s'effectue en basse tension (BTA).

La distribution à partir de petits transformateurs répartis et desservis par une artère moyenne tension (HTA), telle que pratiquée en éclairage public, ne s'avère généralement pas appropriée en raison de la densité des sources lumineuses. La distribution est donc généralement assurée par déviation directe des câbles basse tension issus d'un ou plusieurs postes d'alimentation électrique.

Suivant la longueur du tunnel, le schéma d'alimentation comporte un poste d'alimentation à une seule tête, ou deux postes disposés à chacune des têtes, voire même pour les ouvrages très longs, des postes intermédiaires complémentaires (dont il convient d'étudier l'implantation avec soin).

Le mode de livraison EDF, en BTA ou HTA, ainsi que les possibilités d'intercommunication des postes le cas échéant, sont à étudier cas par cas. On se reportera pour toutes ces questions à la section 4.3 "Alimentation électrique" du dossier pilote.

6.1.2 - Alimentation secourue sans coupure

L'éclairage de sécurité et le jalonnement lumineux

doivent être alimentés par une source d'énergie sans coupure d'une autonomie d'au moins une demi-heure. Cette disposition a deux objectifs :

- éviter que les usagers circulant dans le tunnel se retrouvent dans l'obscurité complète en cas de coupure de la source extérieure d'alimentation électrique,
- si celle-ci survient au moment où se produit un accident ou un incendie, permettre aux usagers de se mettre hors de danger et aux secours d'intervenir.

6.1.3 - Alimentation secourue de puissance

Dans tous les tunnels dotés d'une installation de ventilation, le système d'alimentation électrique du tunnel devra être maintenu en cas de coupure du réseau (par exemple au moyen d'une double alimentation assurée par deux liaisons issues de départs distincts du distributeur ou par la mise en place d'un groupe électrogène d'une autonomie d'au moins quatre heures) ainsi qu'en cas de défaillance partielle du matériel (par exemple en doublant les transformateurs afin d'assurer leur secours mutuel).

Cette alimentation doit pouvoir reprendre le fonctionnement des équipements alimentés par la source sans coupure. Elle devra assurer à pleine puissance le fonctionnement de certains équipements de ventilation mais elle pourra n'assurer qu'une puissance réduite pour l'éclairage de base et de renforcement.

Pour les tunnels qui ne comportent pas de ventilation, deux cas sont à considérer :

- la fermeture du tunnel n'est pas compatible avec le niveau de service de l'itinéraire : alors l'alimentation électrique doit être maintenue comme précédemment afin d'assurer le fonctionnement de l'ensemble des équipements en particulier l'éclairage de base et de renforcement dont la puissance pourra être réduite,
- la fermeture du tunnel peut être admise et il n'y a alors pas lieu de prévoir des dispositions autres que l'alimentation secourue sans coupure définie précédemment.

6.2 - Eclairage de sécurité et jalonnement lumineux

Dans les cas où un éclairage de sécurité et/ou un jalonnement lumineux sont nécessaires (voir § 1.4), leur alimentation électrique doit être maintenue pendant au moins une demi-heure en cas de coupure de l'alimentation électrique extérieure (voir § 6.1.2). Généralement, ceci est réalisé par un ensemble chargeur - batterie - onduleur monté en tampon entre les circuits de sécurité et l'alimentation normale ; cette disposition évite d'avoir une extinction totale de l'éclairage et du jalonnement en cas de défaillance de la source d'énergie électrique normale.

Les circuits d'alimentation de l'éclairage de sécurité doivent être soit protégés des effets directs du feu, soit réalisés avec des câbles de catégorie CR1 (arrêté du 21 juillet 1994). En outre, l'alimentation doit être réalisée suivant le principe du cantonnement, la longueur des cantons ne devant pas excéder 600 mètres environ.

Les plots de balisage lumineux doivent être alimentés suivant le même principe du cantonnement mais avec une longueur des cantons de 100 mètres environ.

Les boîtes de dérivation doivent avoir la même tenue au feu que les circuits principaux auxquelles elles sont raccordées. Les câbles de dérivation ont la même tenue au feu que les équipements qu'ils desservent. Un défaut au droit d'une dérivation ne doit pas entraîner la perte du circuit principal auquel elle est raccordée.



▲ **Photo n°24 - Circuit d'éclairage secouru fixé en voûte pour être indépendant des chemins de câbles dans le tunnel de la Grand-Mare à Rouen (RN 28 Seine Maritime)**

En ce qui concerne la réaction au feu, tous les câbles circulant à l'intérieur du tunnel doivent être de catégorie C1 s'ils ne sont pas placés dans des cheminements protégés des effets d'un incendie. La même catégorie s'impose pour les câbles placés dans les gaines d'air frais et dans les aménagements servant pour l'évacuation des usagers et l'accès des secours en cas d'accident ou d'incendie.

Il convient d'éviter le cheminement des câbles d'éclairage de sécurité sur des chemins de câbles disposés dans l'espace de circulation. Lors d'une élévation de la température ces chemins de câbles peuvent alors s'affaisser et entraîner des courts-circuits au niveau des boîtes d'alimentation. (voir photo n°24)

6.3 - Dimensionnement de l'alimentation électrique

La puissance électrique consommée par l'installation d'éclairage est fonction des niveaux d'éclairage mis en œuvre et de l'importance de l'ouvrage.

Comme indiqué au § 2.4, les niveaux installés doivent être majorés pour tenir compte de la salissure des appareils et du vieillissement des sources. Les valeurs données ci-après tiennent compte d'un facteur de dépréciation global de l'installation de 76 %. Elles se basent sur le nombre de lux.m² obtenu, pour chaque catégorie de sources, en faisant le produit des niveaux d'éclairage théoriques par la largeur et les longueurs où ils doivent être assurés. La puissance totale est obtenue en additionnant les besoins de chaque catégorie de sources.

La puissance nécessaire par lux.m² est la suivante :

- Tubes fluorescents :
 $P_w = 0,035 \text{ à } 0,055 \text{ W/lux.m}^2$
- Sodium basse pression :
 $P_w = 0,025 \text{ à } 0,030 \text{ W/lux.m}^2$
- Sodium haute pression :
 $P_w = 0,025 \text{ à } 0,035 \text{ W/lux.m}^2$ (en général)
 $P_w = 0,040 \text{ W/lux.m}^2$ (dans des cas difficiles de défilement des appareils).

Ces chiffres valables au niveau d'une première étude demandent à être précisés lors d'un projet d'ouvrage d'art où il convient d'effectuer un bilan électrique plus sérieux. Ils ne sont pas applicables pour les systèmes à contre-flux où une étude spécifique doit être effectuée.

6.4 - Dispositifs de commande

Les dispositifs de commande déclenchent automatiquement le fonctionnement des régimes de marche des renforcements et de la section courante, en fonction des différents paramètres extérieurs.

Leurs conception, installation et fonctionnement sont essentiels pour assurer des conditions d'éclairage appropriées tout en limitant les dépenses d'énergie au strict minimum.

Les régimes de section courante sont en général commandés par horocontacteurs et cellules photoélectriques afin de passer des éclairagements diurnes aux niveaux de nuit ou de nuit réduit, en liaison avec l'éclairage public s'il existe à l'extérieur.

La commande des régimes de renforcement d'entrée est en revanche très spécifique, car il s'agit d'adapter les niveaux d'éclairage en tunnel aux conditions d'adaptation visuelle des conducteurs à l'approche de l'ouvrage. La commande ne peut donc être assujettie à un simple relevé de l'ambiance lumineuse extérieure ni même à l'éclairage horizontal. Il convient d'utiliser un capteur sensible à ce que voient les automobilistes.

Aussi emploie-t-on des luminancemètres simplifiés dont le champ de mesure est de 20°. Ils sont placés en avant de la tête à une distance de celle-ci égale, dans la mesure du possible, à la distance d'arrêt des véhicules pour la vitesse de référence, et sont dirigés vers l'entrée du tunnel. On prévoit autant de seuils de déclenchement qu'il y a de régimes de renforcement. A noter que pour les circuits équipés de lampes au sodium haute pression ou de tubes fluorescents haute fréquence, il est également possible de mettre en place un système de variation continue des niveaux en fonction de la luminance mesurée dans le champ de 20°.

Pour des tunnels urbains susceptibles de connaître des engorgements fréquents, il est aussi possible de tenir compte des informations sur l'état du trafic afin de réduire les niveaux d'éclairage si la vitesse des véhicules est systématiquement inférieure à la vitesse de référence pendant une durée suffisante.

Dans tous les cas, il est prévu la possibilité de reprendre la commande de façon manuelle localement ou à distance afin de faire face à des situations d'exploitation particulières (travaux dans l'ouvrage, accident, etc.).

La note d'information n° 4 intitulée "Commande de l'éclairage des tunnels routiers" et publiée par le CETU en février 1994 donne de plus amples informations sur le sujet. Une vidéo est également disponible.



▲ Photo n°25 - Dispositif de commande au tunnel de Ponsérand (RN 90 - Savoie)

Eclairage naturel

7.1 - Généralités

L'éclairage naturel diurne atteint des valeurs très élevées et il est intéressant, lorsque le cas s'y prête, d'étudier tout système permettant de recueillir en tunnel ne serait-ce qu'un faible pourcentage de l'éclairement extérieur. Les éclairements naturels varient en effet de quelques milliers de lux (ciel couvert en hiver) à près de 100 000 lux (grand soleil en été) et même si le "rendement" de certains systèmes utilisateurs de cette énergie gratuite sont faibles, ceux-ci restent cependant très intéressants au regard des niveaux d'éclairage artificiels installés habituellement.

La large plage de variation de l'éclairement naturel est sans influence sur les dispositions envisagées ; en effet lorsque l'éclairage extérieur baisse l'éclairage naturel apporté sur le premier palier diminue mais les besoins des usagers sont moindres.

L'étude de tels systèmes doit tenir compte de la spécificité de l'éclairement naturel qui est le fait d'une part d'une source très ponctuelle, le soleil, dont la position varie au cours de la journée, et d'autre part d'une source diffuse qui est le ciel ou la voûte nuageuse par temps couvert.

Le dimensionnement d'un éclairage naturel peut s'effectuer en utilisant des programmes informatiques développés par différents organismes (CSTB, laboratoire des sciences de l'habitat de l'ENTPE, etc.) ou en réalisant une maquette du site à échelle réduite.

Les systèmes utilisant la lumière naturelle peuvent être classés en deux catégories susceptibles d'être installées aux têtes de tunnel ou dans les tranchées couvertes à faible couverture :

- les ouvertures (latérales ou en voûte),
- les systèmes à transmission (paralumes ou écrans translucides).

7.2 - Ouvertures

7.2.1 - Ouvertures latérales

On rencontre fréquemment ce type d'ouverture dans les zones d'entrée et de sortie des tunnels de montagne.

En fonction de la géométrie et de l'orientation de l'ouvrage, ces dispositifs répondent plus ou moins bien aux contraintes photométriques liées à la pénétration directe de la lumière solaire. Il convient d'éviter en effet la formation de taches de lumière trop éblouissantes sur la chaussée ou dans le champ de vision du conducteur.

Dans la mesure où on peut s'affranchir de ces problèmes, l'intérêt de telles ouvertures est très grand car il n'y a aucune sujétion d'entretien et l'apport de lumière est élevé, quoique fréquemment dissymétrique (la voie proche de l'ouverture est plus éclairée). L'éclairement obtenu avec ces ouvertures latérales peut dispenser d'un premier palier de suréclairage dont le niveau serait de l'ordre de 1 000 à 2 000 lux s'il était réalisé artificiellement.

7.2.2 - Cas d'une succession de tunnels courts

Dans ce cas, rare en pratique, la pénétration de la lumière naturelle aux têtes, par les ouvertures entre les tunnels, peut être suffisante pour remplacer totalement une installation d'éclairage artificiel dont les niveaux seraient nécessairement très élevés (de l'ordre du millier de lux le jour).

Toutefois, en fonction des vitesses autorisées dans ce type d'ouvrage, les brusques variations de niveaux d'éclairage peuvent perturber les conditions de visibilité. Deux solutions sont envisageables pour atténuer ces variations :

- prévoir un éclairage d'appoint dans les tunnels courts, mais sa régulation en fonction des variations des conditions lumineuses extérieures est problématique,
- contrôler la pénétration de la lumière naturelle au moyen de paralumes ou d'écrans translucides disposés entre les tunnels.

Il convient de faire appel à un service spécialisé afin de déterminer comment réaliser à moindre coût une bonne homogénéité des conditions de visibilité à la traversée de tels ouvrages.

7.2.3 - Cas particuliers des butons

Sur certains sites, on peut être amené, pour des raisons liées au génie civil ou à l'aspect architectural de l'ouvrage, à prévoir des poutres transversales dans les zones d'entrée et de sortie.

Du point de vue photométrique, ces poutres sont d'un intérêt très discutable notamment par grand soleil, où l'ombre portée fait apparaître sur la chaussée et les piédroits des bandes qui peuvent être gênantes.

Par contre, elles peuvent servir de support naturel à l'installation de système à transmission (paralumes ou écran translucide tels que décrits en 7.3).

7.3 - Systèmes à transmission

7.3.1 - Paralumes

Classiquement, ce type d'écran se compose d'un double réseau de lames métalliques supportées par une ossature en béton armé. Elles sont verticales ou inclinées de façon qu'aucun rayon solaire ne puisse parvenir directement sur la chaussée : les lames orientées Nord-Sud sont verticales, les lames Est-Ouest en général inclinées vers le Nord de telle manière que les rayons du soleil soient occultés, même au solstice d'été.

Les inconvénients de ces systèmes sont les suivants :

- Ils allongent l'ouvrage dans des zones où la construction est parfois difficile.
- Leur coût peut être élevé.
- L'hiver, ils retiennent la neige ou la glace dont la fonte entraîne des désenrobages d'agrégats et la formation de verglas sur la chaussée.
- Leur pouvoir de réduction de la lumière naturelle, très variable selon le ciel et les heures de la journée, conduit à prévoir un éclairage artificiel complémentaire qui diminue considérablement leur intérêt.
- Leur salissure, assez rapide, leur fait perdre une grande partie de leur efficacité, le nettoyage étant très difficile.

A l'heure actuelle, des recherches menées surtout aux Pays-Bas pour les tunnels orientés Nord-Sud, vont vers des systèmes de paralumes laissant passer une partie de la lumière directe du soleil sur la chaussée. Le principe est que le passage de taches de lumière est beaucoup mieux toléré par l'œil lorsque leur fréquence est élevée. On ne peut encore donner de résultats précis concernant ce type d'installation mais il est évident que leur rendement est de beaucoup supérieur à celui des paralumes classiques.

Les paralumes sont surtout intéressants pour les têtes d'ouvrage qui se prolongent par des tranchées ouvertes à l'extérieur. Dans les autres cas, la construction des voiles latéraux porteurs grève fortement le coût d'investissement de ce type de réalisation. Il faut alors apprécier si les économies obtenues en exploitation sont suffisantes pour justifier ces dispositifs.

L'entretien des paralumes comprend leur examen visuel, leur nettoyage, la vérification de leur état mécanique et de leur comportement en cas de forte chute de neige.

Les paralumes sont construits en matériaux résistant à la corrosion.



▲ Photo n°26 - Paralumes à l'extrémité du tunnel du Rond-Point (Saint-Etienne)

7.3.2 - Couvertures translucides (cas des tranchées couvertes)

Des couvertures translucides peuvent être envisagées dans certaines tranchées couvertes.

Les critères techniques à prendre en compte pour le choix des matériaux translucides sont les suivants :

- transmission lumineuse, qui conduit à retenir des matériaux assurant une bonne diffusion de la lumière naturelle,
- tenue mécanique,
- étanchéité à l'eau,
- facilité de nettoyage,
- comportement dans le temps (pas de risque d'opacification),
- atténuation acoustique, en cas de réalisation devant jouer un rôle de protection acoustique.

L'entretien de ces couvertures est à examiner avec attention :

- bon comportement du matériau sous l'effet des produits de lavage,
- résistance mécanique à la pression du jet d'eau ou des brosses utilisées pour le nettoyage,
- dans certains cas, dimensionnement permettant au personnel de marcher sur les éléments translucides,
- dispositions pratiques facilitant le nettoyage (surface lisse permettant un nettoyage mécanisé par exemple).

Les matériaux de construction des structures principales et de second œuvre d'un tunnel, exception faite des éléments de chaussée, doivent être classés M0 du point de vue de la réaction au feu. La seule exception concerne les éléments de plafond d'une couverture légère pour lesquelles la classe M2 est admise : la perte locale de certains de ces éléments ne présente pas d'inconvénient pour la sécurité à condition que les risques de propagation de l'incendie soient limités ; elles peuvent même présenter des avantages pour l'évacuation des fumées.

Bibliographie

- Guide de l'entretien de l'installation d'éclairage (CETU) - Juin 1979 - 32 pages.
- Association mondiale de la route (AIPCR)
Comité des tunnels routiers - Rapports présentés aux Congrès mondiaux de la route à Vienne (1979), Sydney (1983), Bruxelles (1987).
- Circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national.
- Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques.
Association Française de l'Eclairage - (AFE) - (en cours de publication)
- Vocabulaire de l'éclairage.
Association Française de l'Eclairage (AFE) - 1991
- Guide for the lighting of roads tunnels and under passes
Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) - 1990 (en cours de refonte).
- Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting
Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) - 1982 - Publication 30-2.
- Arrêté du 30 Juin 1983 portant classification des matériaux de construction et d'aménagement selon leur réaction au feu et définition des méthodes d'essai. Ministères Urbanisme et Logement Transports - fascicule spécial 48 ter de 1983.
- Arrêté du 28 Août 1991 modifiant l'arrêté du 30 Juin 1983 portant classification des matériaux de construction et d'aménagement selon leur réaction au feu et définition des méthodes d'essais. Ministère de l'Intérieur.

- Fiches techniques CETUR (groupe de travail éclairage public)
 - 1.2.1 - Définitions et unités (1/88)
 - 2.3.1 - Lampes utilisées en éclairage public (6/86)
 - 2.3.2 - Tubes fluorescents (10/86)
 - 2.3.4 - Lampes à vapeur de sodium haute pression (10/86)
 - 2.3.5 - Lampes à vapeur de sodium basse pression (10/86)
 - 2.4.1 - Accessoires d'amorçage (9/87)
 - 2.4.2 - Ballasts (9/87)
 - 2.4.3 - Condensateurs (5/88)
 - 2.4.4 - Système de réduction de puissance consommée (1/88)
 - 2.4.5 - Compensateurs de surtension (8/90)
 - 2.4.7 - Ballasts électroniques (1/93)
 - 3.1.1 - Appareils de mesure (1/88)
 - 3.1.2 - Contrôles photométriques (1/88)
 - 5.2.2 - Eclairage des tunnels et passages souterrains à gabarit réduit (5/88)

- Fiches d'informations CERTU

- Commande de l'éclairage des tunnels routiers
 - Note d'information n° 4 (CETU) - Février 1994 - 4 pages
 - Une vidéo est également disponible

- Méthode de dimensionnement de l'éclairage d'entrée des tunnels routiers (CETU) - 1998

Service documentaire du CETU

Pour consulter les documents cités dans le dossier-pilote ou procéder à des recherches bibliographiques on peut s'adresser au service documentaire du CETU.

Tél : 04 72 14 33 75

**E-mail :
documentation.cetu@equipement.gouv.fr**

Illustrations photographiques

Photo couverture :	Tunnel de la Citadelle à Besançon (photo donnée par Philips France - Division Eclairage)
Photo n° 1	Tunnel de la Vierge sur la RN 9 à Lodève (renforcement éteint) (photo CETU)
Photo n° 2	Tunnel de la Grand-Mare à Rouen (zone d'entrée) (photo CETU)
Photo n° 3	Tunnel de Nogent sur A86 dans le Val de Marne (section courante) (photo de C. Remande - Société Comatelec)
Photo n° 4	Tunnel de Cornil (RN 89 - Corrèze) (photo CETU)
Photo n° 5	Piédroits clairs avec éclairage à contre-flux dans le tunnel des Treize Vents (Autoroute A 55) (photo CETU)
Photo n° 6	Eclairage d'un garage dans le tunnel Maurice Lemaire (Sainte-Marie-aux-Mines RN 159 - Vosges) (photo HADET)
Photo n° 7	Bretelle de sortie dans le tunnel de Rocheardon (Boulevard Périphérique Nord de Lyon) (photo CETU)
Photo n° 8	Tunnel de la Grand-Mare sur la RN 28 à Rouen (section courante) (photo S3P)
Photo n° 9	Entrée du tunnel de Fourvière à Lyon (photo CETU)
Photo n° 10	Tunnel Bobigny Drancy sur A86 dans la Seine Saint-Denis (zone de sortie) (photo de C. Remande - Société Comatelec)
Photo n° 11	Trémie des Brotteaux à Lyon (la condition de "sortie visible" n'est pas remplie) (photo CETU)
Photo n° 12	Tunnel de Langesse sur l'autoroute A8 (la condition de "sortie visible" est remplie) (photo CETU)

Photo n° 13	Voies de circulation claires et bande d'arrêt d'urgence sombre : à déconseiller en tunnel (photo CETU)
Photo n° 14	Chaussée claire dans le tunnel du Chatelard (RN 205 - Haute-Savoie) (photo CETU)
Photo n° 15	Appareils symétriques à tubes fluorescents dans le tunnel de Dame-Joliette (Marseille) (photo CETU)
Photo n° 16	Galerie latérale d'éclairage dans la tranchée couverte de Champigny (autoroute A 4 - Val de Marne) (photo CETU)
Photo n° 17	Eclairage à contre-flux dans la tranchée couverte de Mantes la Ville (autoroute A 13 - Yvelines) (photo CETU)
Photo n° 18	Luminaire au sodium haute pression (photo CETU)
Photo n° 19	Deux files d'appareils en voûte dans le tunnel du Rosti (autoroute A8 - Alpes Maritimes) (photo CETU)
Photo n° 20	File unique d'appareils dans le tunnel de Noailles (RN 20 - Corrèze) (photo CETU)
Photo n° 21	Installation bilatérale dans la tranchée couverte de Bobigny (autoroute A86 - Seine Saint-Denis) (photo de C. Remande - Société Comatelec)
Photo n° 22	Luminaire à contre-flux (sodium haute pression) (photo donnée par Philips France - Division Eclairage)
Photo n° 23	Renforcement à contre-flux et éclairage de base symétrique dans le tunnel de la Grand-Mare à Rouen (RN 28 - Seine Maritime) (photo S3P)
Photo n° 24	Circuit d'éclairage secouru fixé en voute pour être indépendant des chemins de câbles dans le tunnel de la Grand-Mare à Rouen (RN 28 - Seine Maritime) (photo CETU)
Photo n° 25	Dispositif de commande au tunnel de Ponsérand (RN 90 - Savoie) (photo CETU)
Photo n° 26	Paralumes à l'extrémité du tunnel du Rond-Point (Saint-Etienne - Loire) (photo CETU)

Glossaire

Référence : Vocabulaire de l'éclairage (document établi par l'Association Française de l'Eclairage).

◆ Adaptation

Processus de modification de l'état d'un système visuel qui a été soumis à des stimuli lumineux de différentes luminances, répartitions spectrales et étendues angulaires.

◆ Amorceur

Appareil qui, soit seul, soit en combinaison avec d'autres éléments du circuit, engendre des impulsions de tension destinées à amorcer des lampes à décharge sans assurer de préchauffage des électrodes.

◆ Ballast

Dispositif interposé entre l'alimentation et une ou plusieurs lampes à décharge et qui sert principalement à limiter le courant de la ou des lampes à la valeur requise.

◆ Candela

Unité SI (Système International) d'intensité lumineuse : intensité lumineuse dans une direction donnée d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.
Symbole : cd

◆ Coefficient de luminance q

(utilisé en éclairage public)

(en un élément de surface d'un milieu, dans une direction donnée et dans des conditions d'éclairage données)

Quotient de la luminance de l'élément de surface dans la direction donnée par son éclairage.

◆ Confort visuel

Impression subjective de satisfaction du système visuel principalement procurée par l'absence de gêne induite par l'ensemble de l'environnement visuel.

◆ Culot

Partie d'une lampe servant à la relier au circuit électrique d'alimentation par l'intermédiaire d'une douille ou d'un connecteur de lampe et, dans la plupart des cas, servant également à retenir mécaniquement la lampe dans la douille.

◆ Défilement

Moyens employés pour dissimuler à la vue directe les lampes et les surfaces de luminance élevée afin de réduire l'éblouissement.

◆ Eblouissement

Conditions de vision dans lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer de petits objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances, ou d'un contraste excessif.

On distingue l'éblouissement inconfortable produisant une sensation désagréable sans nécessairement troubler la vision des objets et l'éblouissement perturbateur qui trouble la vision des objets sans provoquer nécessairement une sensation désagréable.

◆ Eclairage

Quotient du flux lumineux reçu sur un élément de surface par l'aire de cet élément.
Unité : lux (lx)

◆ Efficacité lumineuse d'une source

Quotient du flux lumineux émis par la puissance consommée par la source
Unité : lumen par watt (lm.W⁻¹)

◆ Facteur de réflexion ρ

(Pour un rayonnement incident de composition spectrale, polarisation et répartition géométrique données)

Rapport du flux réfléchi au flux incident dans les conditions données.

Note 1 : En général, la réflexion sur une surface est mixte, elle comprend :

- la réflexion régulière (spéculaire) p_r qui est une réflexion sans diffusion obéissant aux lois optiques valables pour les miroirs,
- la réflexion diffuse p_d dans laquelle la réflexion régulière ne se manifeste pas.

Pour la réflexion mixte on a $p = p_r + p_d$

Note 2 : En physique, lorsque l'on parle de réflexion, sans préciser, on sous-entend la réflexion régulière. En éclairagisme, dans le même cas, il s'agit de la réflexion diffuse ou mixte.

◆ Facteur de transmission

(pour un rayonnement incident de composition spectrale, polarisation et répartition géométrique données)

Rapport du flux transmis au flux incident dans les conditions données.

◆ Flux énergétique

Puissance émise, transmise ou reçue sous forme de rayonnement.

Unité : watt (W)

◆ Flux lumineux

Grandeur dérivée du flux énergétique par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur l'observateur CIE pour la vision photopique.

◆ Hauteur de feu

Distance verticale entre le centre photométrique d'un luminaire et la surface à éclairer.

◆ Hublot

Luminaire protégé et compact conçu pour être fixé directement sur une paroi verticale ou horizontale. S'applique en particulier à des dispositifs de jalonnement.

◆ Intensité lumineuse d'une source dans une direction

Quotient du flux lumineux quittant la source et se propageant dans un élément d'angle solide contenant la direction donnée par cet élément d'angle solide.

Unité : candela (cd).

◆ Indice de rendu des couleurs

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), dans sa publication n° 13- (1995) a défini un indice général de rendu des couleurs, moyenne des indices particuliers de rendu des couleurs

pour un ensemble spécifié de huit échantillons de couleur test. Un indice particulier est une évaluation quantitative (l'état d'adaptation chromatique ayant été correctement pris en compte) du degré d'accord entre la couleur psychophysique d'un échantillon de couleur éclairé par la source étudiée et une source de référence ayant la même température de couleur proximale et dont l'indice est, par définition égal à 100. La source de référence est constituée par le corps noir entre 2 300 et 5 000 °K, et, au-delà par une lumière naturelle normalisée.

◆ Lampe à induction

Lampe fluorescente, sans électrodes, de forme compacte, dont la décharge est induite par un flux d'énergie à haute fréquence.

◆ Lampe fluocompacte

Lampe fluorescente dont le tube à décharge de petit diamètre a été mis en forme pour tenir dans un volume réduit.

◆ Lampe fluorescente ; lampe à fluorescence

Lampe à vapeur de mercure à basse pression dans laquelle la plus grande partie de la lumière est émise par une ou plusieurs couches de substances photoluminescentes excitées par le rayonnement ultraviolet de la décharge.

◆ Lampe (à vapeur de) sodium basse pression

Lampe dans laquelle la lumière est principalement produite par le rayonnement de la vapeur de sodium dont la pression partielle, pendant le fonctionnement, se situe entre 0,1 et 0,5 pascal.

◆ Lampe (à vapeur de) sodium haute pression

Lampe dans laquelle la lumière est principalement produite par le rayonnement de la vapeur de sodium dont la pression partielle, pendant le fonctionnement, est de l'ordre de 10 000 pascals ou plus.

◆ Lumen

Unité SI (Système International) de flux lumineux : flux lumineux émis dans l'angle solide unité (stéradian) par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse d'un candéla.
Symbole : lm

◆ Luminance

Grandeur qui traduit la luminosité d'une petite surface regardée dans une direction donnée et qui dépend à la fois des conditions d'éclairage de cette surface, de ses caractéristiques propres de réflexion et du point d'observation.

Unité : candela par m² (cd.m⁻²)

◆ Luminancemètre

Appareil destiné à la mesure des luminances. (voir Norme NF C 42-711)

◆ Luminosité

Attribut d'une sensation visuelle selon lequel une surface paraît émettre plus ou moins de lumière.

◆ Lux

Unité SI (Système International) d'éclairage : éclairage produit sur une surface dont l'aire est 1 mètre carré par un flux lumineux de 1 lumen uniformément réparti sur cette surface. Symbole : lx

◆ Luxmètre

Appareil destiné à la mesure des éclairages. (voir Norme NF C 42-710).

◆ Observateur de référence photométrique CIE

Observateur idéal dont la courbe de sensibilité spectrale relative est conforme à une fonction normalisée $V(\lambda)$ pour la vision scotopique et qui satisfait à la loi d'addition impliquée dans la définition du flux lumineux.

◆ Paralume : écran-paralume

1^{er} sens (grille de défilement)

Ecran formé d'éléments translucides ou opaques géométriquement disposés de façon à masquer les lampes à la vue directe sous un angle déterminé.

2^{ème} sens

Dispositif de génie civil, composé de lames métalliques supportées par des poutres en béton armé, qui peut être disposé en entrée et/ou en sortie de tunnel.

◆ Platine

Élément rigide métallique ou isolant sur lequel sont fixés les accessoires nécessaires au fonctionnement des lampes à décharge.

◆ Protection procurée par les enveloppes des luminaires

Elle est définie par les deux chiffres qui suivent les lettres IP qui caractérisent l'indice de protection. (voir norme NF EN 60598).

◆ Réflexion ou transmission diffuse isotrope

Réflexion ou transmission diffuse dans laquelle la répartition spatiale du rayonnement réfléchi ou transmis est telle que la luminance soit la même dans toutes les directions de l'hémisphère dans lequel le rayonnement est réfléchi ou transmis.

Note 1 : Les diffuseurs isotropes sont parfois appelés "diffuseurs conformes à la loi de Lambert" ou "surfaces lambertiennes".

Note 2 : Le diffuseur isotrope idéal dont le facteur de réflexion ou de transmission est égal à 1 est appelé "diffuseur parfait".

◆ Source lumineuse

Une source lumineuse peut être constituée par une lampe ou par un luminaire contenant une ou plusieurs lampes.

◆ Starter

Dispositif d'amorçage, destiné en particulier aux lampes fluorescentes, qui assure le préchauffage nécessaire des électrodes et, en combinaison avec l'impédance du ballast, provoque une surtension momentanée sur la lampe.

◆ Variateur ; gradateur de lumière

Dispositif électrique ou électronique permettant de faire varier le flux lumineux des lampes dans une installation d'éclairage.

◆ Visibilité

Terme utilisé pour apprécier qualitativement la facilité, la rapidité et la précision avec lesquelles un objet peut être détecté ou identifié visuellement.

◆ Vision photopique

L'œil est adapté à des niveaux de luminance d'au moins plusieurs cd/m²

◆ Vision scotopique

L'œil est adapté à des niveaux de luminance inférieurs à quelques centièmes de cd/m²

◆ Vision mésopique

Elle est intermédiaire entre la vision photopique et la vision scotopique.



CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS

25, AVENUE FRANCOIS-MITTERRAND - CASE N°1 - 69674 BRON CEDEX FRANCE
TEL : 04 72 14 34 00 - TELECOPIE : 04 72 14 34 30 - E-mail : cetu@equipement.gouv.fr