

**MINISTERE DE L'URBANISME
DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS**

Direction des Routes

**GUIDE DE L'ECLAIRAGE
DES TUNNELS ROUTIERS**

Mai 1985



Centre d'Etudes des Tunnelles

Ce document est propriété de l'administration et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation du Directeur du Centre d'Etudes des Tunnels (ou de ses représentants autorisés).

© C.E.Tu – 1985
ISBN 2-11-084724-7

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	7
CHAPITRE 1 – DIMENSIONNEMENT DE L’ECLAIRAGE	9
1.1. – But de l’éclairage	9
1.1.1. Généralités	9
1.1.2. Tâche visuelle	9
1.1.3. Définition et histoire du point d’attention	10
1.2. – Notions théoriques fondamentales	13
1.2.1. Notions élémentaires	13
1.2.2. Tâche visuelle : traduction en termes de luminances	15
1.2.3. Luminance rétinienne et contraste rétinien	15
1.2.4. Application à C_R et L_R de fonctions particulières	18
1.2.5. Défaut d’adaptation temporelle	23
1.2.6. Equation fondamentale de visibilité	23
1.3. – Vérification de l’équation	24
1.3.1. Remarque préliminaire	24
1.3.2. Vérification expérimentale	24
1.3.3. Conclusion	37
1.4. – Exploitation méthodologique	37
1.4.1. Exploitation ne prenant pas en compte le défaut d’adaptation temporelle	37
1.4.2. Prise en compte du défaut d’adaptation temporelle	55
1.4.3. Détails pratiques	69
1.5. – Mobilisation de contraste	74
1.5.1. Importance du contraste pour la vision d’obstacles à l’entrée des tunnels routiers	74
1.5.2. Utilisation de l’équation fondamentale de visibilité	75
1.5.3. Quel système pour une vision d’un maximum d’objets	76
1.5.4. Gain théorique possible	79
1.5.5. Conclusion et suite à donner	90
1.6. – Comparaison avec les autres errements	91
1.6.1. Principales théories existantes	91
1.6.2. Avantages de la méthode C.E.Tu.	93
1.7. – Eclairage de nuit	93
1.7.1. Conditions de vision nocturne	93
1.7.2. Besoins en éclairage	93

	Pages
1.8. – Tunnels courts	93
1.8.1. Exposé du problème	93
1.8.2. Critères de choix et niveau de l'éclairage diurne des tunnels courts	94
1.8.3. Systèmes assurant le guidage de l'utilisateur	100
1.9. – Niveaux d'éclairement correspondant aux luminances	101
1.9.1. Les différentes réflexions possibles de la lumière	101
1.9.2. Approximation à la Loi de Lambert	102
1.9.3. Intérêt des chaussées claires	103
1.9.4. Exemple : valeurs pratiques d'éclairement retenues en section courante	103
1.9.5. Exemples de valeurs d'éclairement retenues en renforcement d'entrée	103
CHAPITRE 2 – SYSTEMES D'ECLAIRAGE	105
2.1. – Généralités	105
2.2. – Systèmes à flux dirigé de type classique	105
2.3. – Systèmes à mobilisation de contraste	107
2.4. – Galerie spéciale d'éclairage	108
2.5. – Galerie avec appareils à flux dirigé	110
2.6. – Systèmes utilisant la lumière naturelle	111
2.6.1. Ecrans ajourés	113
2.6.2. Ecrans translucides	114
2.7. – Critères de choix	115
CHAPITRE 3 – PROJET	117
3.1. – Choix de base – Conception générale – 1 ^{re} estimation	117
3.1.1. Objet	117
3.1.2. Choix fondamentaux	117
3.1.3. Niveaux d'éclairement	117
3.1.4. Réalisation des éclairagements	118
3.1.5. Puissance	119
3.1.6. Estimations	119
3.2. – Projet détaillé	120
3.2.1. Objet	120
3.2.2. Présentation des études à effectuer	120
3.2.3. Détermination des paliers de suréclairage et des longueurs d'application	120
3.2.4. Détermination des régimes de fonctionnement	121
3.2.5. Détermination du flux à réaliser	121
3.2.6. Répartition des appareils	122
3.2.7. Puissances mises en jeu – Alimentation électrique	129
3.2.8. Dispositifs de commande	129
3.2.9. Positionnement et fixation des appareils et des câbles	131

	Pages
3.3. – Coût de premier investissement	132
3.3.1. Conditions générales d'estimation	132
3.3.2. Prix de référence	132
3.3.3. Prix unitaires	133
3.4. – Procédure d'études pour les opérations où l'Etat est maître d'ouvrage	135
3.4.1. Objet	135
3.4.2. Procédure applicable aux ouvrages d'art non courants	135
3.4.3. Rôle des différentes phases pour un projet d'éclairage de tunnel. Correspondance avec les § 3.1 et 3.2	135
 CHAPITRE 4 – MARCHE ET REALISATION	 137
4.1. – Le dossier de consultation des entreprises	137
4.1.1. Procédure de passation des marchés	137
4.1.2. Clauses techniques des cahiers des charges	138
4.1.3. Clauses financières des cahiers des charges	142
4.2. – Jugement des offres	143
4.2.1. Caractéristiques mécaniques	143
4.2.2. Caractéristiques photométriques	143
4.2.3. Caractéristiques électriques	143
4.2.4. Caractéristiques géométriques	144
4.2.5. Coûts	144
4.3. – Le marché – La réalisation et la réception	144
4.3.1. Rédaction du marché	144
4.3.2. Suivi de chantier	144
4.3.3. Réception	144
 CHAPITRE 5 – EXPLOITATION	 147
5.1. – Définition de l'entretien	147
5.1.1. Renouvellement des sources	147
5.1.2. Nettoyage des luminaires	147
5.1.3. Entretien divers concernant les luminaires	147
5.1.4. Entretien de l'installation électrique liée à l'éclairage	148
5.1.5. Paralumes	148
5.2. – Incidences de l'entretien sur le projet	148
5.2.1. Implantation des appareils	148
5.2.2. Nettoyage du tunnel	148
5.2.3. Entretien divers lié à l'appareil d'éclairage	148
5.2.4. Entretien de l'installation électrique liée à l'éclairage	148
5.2.5. Paralumes	149
5.3. – Coût d'exploitation	149
5.3.1. Coût de maintenance	149
5.3.2. Coût de consommation électrique	149
5.3.3. Coût total d'exploitation	150

BIBLIOGRAPHIE	Pages 151
ANNEXE 1 : LES SOURCES LUMINEUSES	155
ANNEXE 2 : APPAREILS D'ECLAIRAGE	165
ANNEXE 3 : EXEMPLES DE REALISATIONS FRANÇAISES	173

Provenance des photographies :

- C.E.Tu. figures n^{os} 14, 82, 84, 86, 87, 88, 92, 93, 95, 96, 99, 100, 101.
- Studio Bertrand Saint-Etienne figures n^{os} 79, 98.
- Laboratoire de la D.R.E.I.F. : figure n^o 81.
- Dokumentation Bernische Kraftwerke AG Bern : figure n^o 83.
- Laboratoire D.D.E. 06 : figure n^o 89.
- Laboratoire C.E.T.E. Aix-en-Provence : figure n^o 91.
- Pour l'annexe 3, photographies du C.E.Tu. et des studios Collet (Beausoleil), Amadou (Bastia), Mollard (Chambéry) et Zalateu (Modane).
- Couverture : photographie E.I. (Lyon).

PREAMBULE

Le guide de l'éclairage des tunnels routiers a pour objectif principal de permettre la conduite d'un projet s'appuyant sur une méthodologie mise au point et testée au Centre d'Etudes des Tunnels.

Il aborde de manière qualitative puis quantitative le problème particulier de l'éclairage diurne des tunnels en présentant une théorie basée exclusivement sur la visibilité d'obstacles éventuels.

La grande originalité de la méthode proposée est due à sa souplesse d'utilisation dans tous les cas possibles d'ouvrages, de vitesses des usagers, de choix de systèmes d'éclairage, d'opacité intérieure et extérieure au tunnel.

Des travaux complémentaires sont certes nécessaires pour affiner certains points et ce document ne peut être considéré comme figé et définitif. Il présente cependant un état le plus complet possible des connaissances du C.E.Tu. acquises lors des recherches et des projets traités par le service.

Le soutien théorique prend une place importante dans la partie consacrée au dimensionnement. Il est en effet indispensable de connaître et d'utiliser au mieux les facultés de l'œil humain afin d'optimiser les dépenses d'énergie et d'investissement tout en conservant le but premier : la sécurité des usagers.

Bien que le présent guide soit orienté en pratique vers les cas courants il ne peut se substituer à une étude (ou au moins à un avis circonstancié) d'une équipe spécialisée. Cette notion de spécialiste revient d'ailleurs souvent à chaque étape du projet. Il faut en effet souligner que toute économie réalisée lors de la conception a des conséquences sur l'exploitation de l'ouvrage ; elle doit donc être pesée avec toute la rigueur nécessaire et c'est évidemment à ce niveau de décision que le spécialiste peut rendre le plus grand service.

Il est d'autre part nécessaire d'accorder aux entreprises des délais de réponse aux consultations leur laissant le temps d'étudier soigneusement leurs propositions.

Le syndicat des constructeurs de matériels d'éclairage électrique a, dans le cadre de sa "Commission Tunnels", participé à l'élaboration de ce document en donnant de précieux avis dont il a été tenu compte.

CHAPITRE PREMIER

DIMENSIONNEMENT DE L'ECLAIRAGE

1.1. BUT DE L'ECLAIRAGE

1.1.1. Généralités

Un bon projet routier doit présenter une homogénéité des conditions de sécurité.

Dès que la longueur d'un tunnel dépasse quelques dizaines de mètres, la pénétration de la lumière extérieure devient très faible. On conçoit que le passage d'une ambiance lumineuse intense à un milieu aussi obscur qu'un tunnel non éclairé, ne puisse être toléré. Mais éclairer un tunnel ou d'une manière plus générale un itinéraire routier, c'est savoir répondre à une multitude de questions découlant de celle-ci : " qu'apportera cet éclairage à la sécurité de l'usager ? " car " faire " de la sécurité n'est pas chose aisée, et il s'agit avant tout de ne pas essayer n'importe quoi. Pour exprimer la difficulté à cerner les problèmes de relation entre vision et sécurité, on peut citer une étude de NEBOIT de l'ONSER en 1981 (1). Celui-ci a montré qu'une insuffisance visuelle, même sensible, n'était pas à coup sûr un facteur supplémentaire d'accident et qu'une bonne acuité visuelle n'était pas du tout garante d'une conduite en toute sécurité : lier la sécurité de l'usager uniquement au phénomène de vision est donc une approche par trop simpliste d'un problème sans doute très complexe.

Cette remarque entraîne une grande modestie dans les conclusions de nos travaux et nous devons toujours avoir à l'esprit que régler un problème de vision n'est pas toujours suffisant à supprimer des causes d'accidents, même si nous sommes convaincus de faire ainsi un grand pas dans le sens de la sécurité.

On recherchera donc, par un éclairage approprié, à assurer une bonne continuité des performances de vision des conducteurs abordant et traversant un tunnel routier. De plus, en raison du milieu très restreint que constitue l'intérieur de l'ouvrage, tout accident peut avoir des conséquences bien plus graves qu'à l'air libre.

Le projeteur doit tout mettre en œuvre pour faciliter l'écoulement du trafic et un bon éclairage est un facteur essentiel de cet objectif. Enfin, la notion de confort ne doit pas être écartée, et là aussi l'éclairage joue un rôle important. Les notions de sécurité abordées entraînent deux questions préalables à toute étude d'éclairage : quelle doit être la tâche visuelle du conducteur traversant un tunnel routier ? que se passe-t-il au niveau de la vision de cet usager parcourant un tel ouvrage ?

1.1.2. Tâche visuelle

On peut distinguer deux grandes rubriques :

1° La vision d'obstacles éventuellement présents sur la chaussée est nécessaire afin d'éviter tout incident pouvant entraîner comme on l'a déjà dit un accident grave.

Si l'on veut raisonner en termes de visibilité, la recherche des conditions d'homogénéité sur un itinéraire entraîne le choix de la vision d'obstacles pour le dimensionnement de l'éclairage, car de jour, sur une route à l'air libre, l'usager peut distinguer les moindres détails de la chaussée.

Les méthodes de calcul de l'éclairage nécessaire en tunnel sont donc toutes basées sur la vision d'obstacles.

2° Le guidage est considéré comme suffisant. Le choix d'un éclairage réalisant un bon guidage constitue un minimum à réaliser si le critère de la vision d'obstacles ne peut être retenu (par exemple pour des raisons financières). Quelques précisions concernant les systèmes basés sur le guidage des usagers sont données au § 1.8.3.

1.1.3. Définition et histoire du point d'attention

1.1.3.1. Définition du point d'attention

Le facteur "Sécurité" des usagers peut être approché de manière satisfaisante par l'assertion suivante : tout conducteur doit être à même de stopper son véhicule suffisamment tôt pour ne pas percuter un éventuel obstacle présent sur la chaussée. La notion de distance d'arrêt, directement reliée à la vitesse des véhicules prend très bien en compte ce phénomène.

L'attention d'un conducteur est la plupart du temps diffuse, et il est très difficile de la définir.

Pour le cas qui nous intéresse, il existe deux courants opposés qui encadrent la situation réelle : l'un affirme que le conducteur est en attention diffuse et ne regarde le tunnel que pendant de très brefs instants, l'autre, appuyé sur des campagnes d'essais (2) "in situ" considère que l'usager fixe uniquement l'entrée du tunnel dès qu'il est à 200 m environ de celle-ci (lorsque la géométrie du tracé le permet). Nous verrons que la prise en compte de la deuxième hypothèse conduit à des éclairages déjà très puissants.

Nous avons retenu, dans notre méthodologie, une approche similaire à celle-ci.

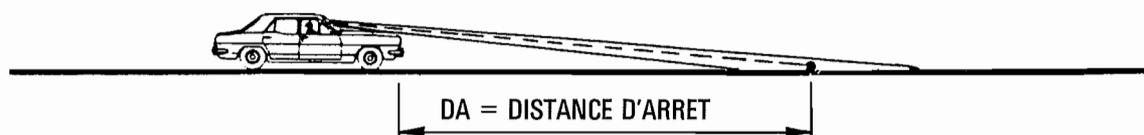
Ensuite et durant toute la traversée du tunnel, l'attention reste très soutenue car il n'y a pas de distraction engendrée par le paysage très restreint, et en général le confinement rend l'usager moins détendu qu'à l'air libre.

Nous considérons pour tout l'ouvrage que l'usager fixe à peu près constamment la chaussée devant lui. S'il peut percevoir tout obstacle dangereux situé au-delà de sa distance d'arrêt, la sécurité sera jugée assurée.

La vitesse limite de l'itinéraire étant donnée, il s'agira de définir l'éclairage assurant la visibilité d'obstacles depuis une distance au moins égale à la distance d'arrêt correspondante.

Le point d'attention est défini de la manière suivante : l'usager représentatif regarde la chaussée à une distance égale à sa distance d'arrêt. Son regard est fixé dans cette position.

DEFINITION DU POINT D'ATTENTION



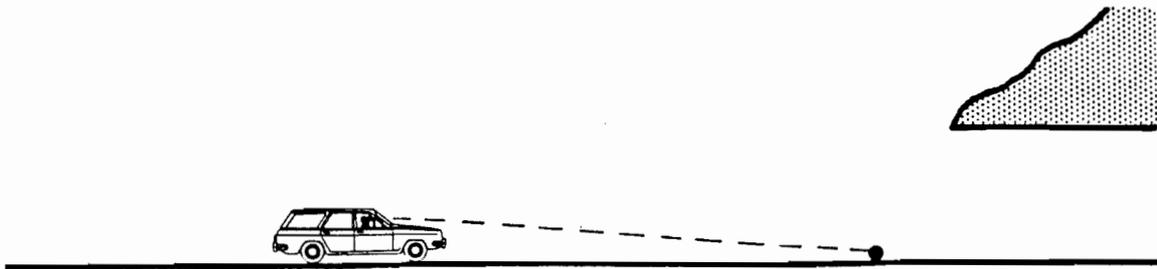
Cette hypothèse est relativement schématique, mais on verra qu'elle est nécessaire si l'on veut étudier de manière quantitative les phénomènes physiologiques directement responsables de la vision du conducteur.

Nous montrerons qu'elle conduit à un minimum d'éclairage, ce minimum pouvant être parfois très élevé.

Le point d'attention étant ainsi défini, voyons de manière qualitative ce qui se produit au niveau de la rétine du conducteur abordant et traversant un tunnel.

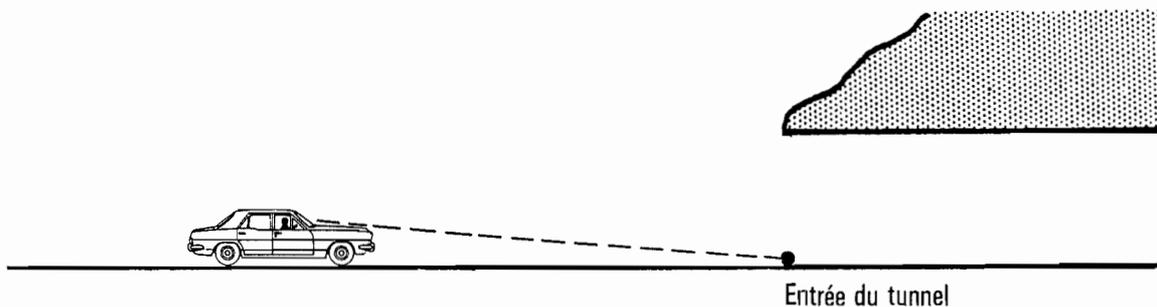
1.1.3.2. Histoire du point d'attention à la traversée d'un tunnel

a) Le point d'attention est extérieur au tunnel



Pour l'instant, tout se passe très bien car l'utilisateur, comme on l'a dit plus haut, est en attention soutenue et la chaussée est éclairée par la lumière diurne très puissante. La vision est très bonne.

b) Le point d'attention pénètre dans le tunnel



L'utilisateur est toujours soumis à l'éclairage diurne, mais fixe un point situé dans l'ombre. On sait que les facultés de l'œil à s'adapter à des niveaux lumineux très différents sont énormes mais deux phénomènes se produisent ici. Ils sont appelés défauts d'adaptation car ils empêchent l'œil de s'adapter à la nouvelle "plage de luminance" qu'il rencontre : ce sont les défauts d'adaptation temporelle et spatiale.

Ces deux défauts interviennent simultanément :

– défaut d'adaptation spatiale :

Il est dû à des imperfections de l'œil, on peut l'appeler aussi éblouissement. Nous le définissons en détail au § 1.2. Il représente la difficulté de perception en vision centrale lorsque celle-ci s'effectue sur une plage sombre, alors que le champ visuel périphérique est très éclairé ; c'est un phénomène statique donc instantané.

– défaut d'adaptation temporelle :

L'adaptation de l'œil est sa faculté d'assurer une vision correcte dans une plage énorme de luminances (10^{-4} à 10^5 cd/m²).

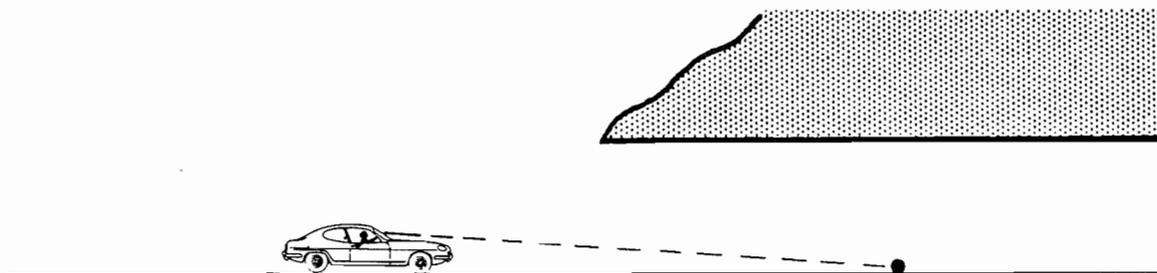
Il s'adapte donc aux luminances qui lui sont présentées, cependant une variation lumineuse de grande amplitude et très rapide n'est pas suivie d'une adaptation instantanée de l'œil, c'est le défaut d'adaptation temporelle.

Le problème qui nous intéresse ici est celui du passage de fortes luminances (conditions extérieures) à des faibles luminances (dans le tunnel), dans un temps très réduit.

A l'inverse du défaut d'adaptation spatiale, ce phénomène est dynamique (il dépend en particulier de la vitesse de l'utilisateur).

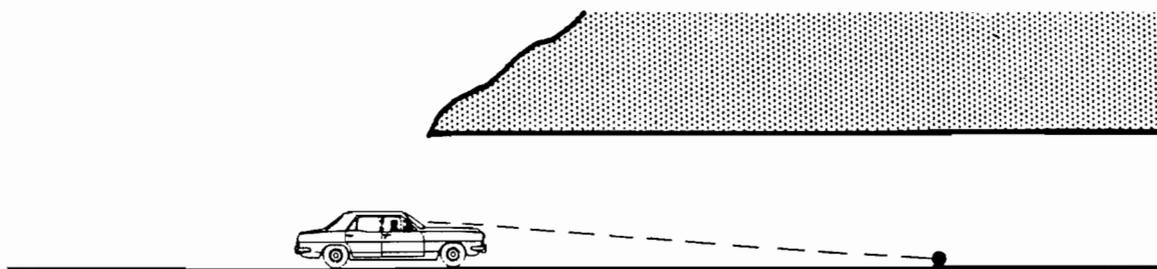
Si l'on n'éclaire pas l'entrée du tunnel, la conjugaison des défauts d'adaptation entraîne une perte considérable de vision. Cependant, contrairement à l'intuition la plus répandue, le défaut d'adaptation spatiale est au moins aussi important que le défaut d'adaptation temporelle, pour la vision aux entrées de tunnels.

c) Le conducteur approche du tunnel



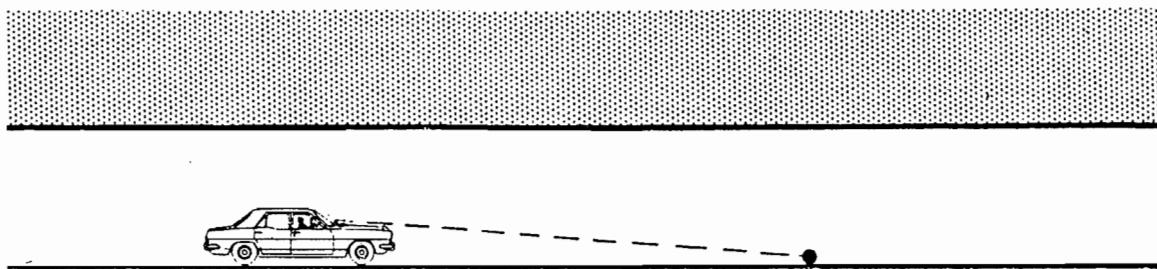
Le tunnel prend de plus en plus d'importance dans le champ périphérique proche et donc le défaut d'adaptation spatiale diminue. Le défaut d'adaptation temporelle subsiste évidemment.

d) Le conducteur pénètre dans le tunnel



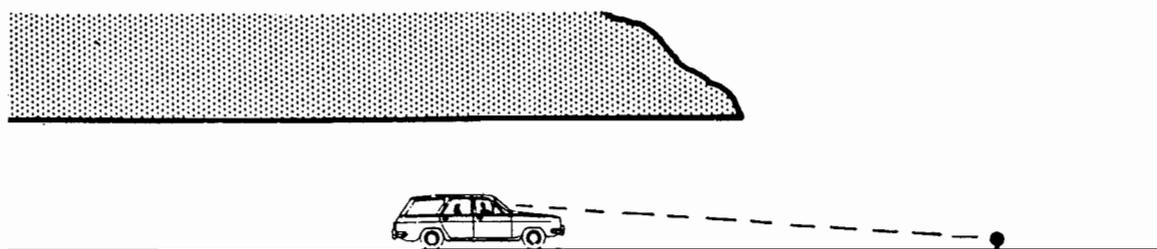
Le défaut d'adaptation spatiale disparaît car le champ périphérique a maintenant une luminosité du même ordre de grandeur que le champ central. On verra que le conducteur retrouve une grande partie des possibilités de perception qu'il avait à l'air libre. Subsiste le défaut d'adaptation temporelle ; on verra que pour combattre ce dernier, on doit assurer un éclairage (dit de transition) dégressif jusqu'à obtention du niveau de section courante.

e) Le conducteur et le point d'attention sont dans le tunnel



Au bout d'un "certain temps" l'œil est adapté aux luminances faibles de l'intérieur du tunnel. L'éclairage doit être suffisant pour permettre à l'utilisateur une vision correcte. Le problème est similaire à celui de l'éclairage public.

f) Le conducteur est encore dans le tunnel, le point d'attention est à l'extérieur

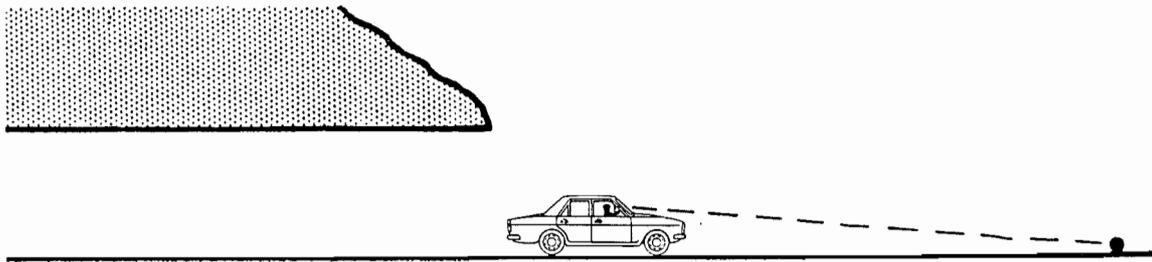


Du point de vue spatial, la situation est excellente ; en effet, le champ central est très lumineux et le champ périphérique sombre.

Il se produit par contre un nouveau défaut d'adaptation temporelle en raison du saut brusque de luminance. Cependant des travaux ont montré que celui-ci était beaucoup moins contraignant car l'œil subit plus facilement les passages des faibles aux fortes luminances, à condition de ne pas se trouver dans des situations extrêmes (neige au soleil, étendue d'eau miroitante, soleil de face bas sur l'horizon...).

Dans ces cas particuliers, il convient de prévoir une zone dite de renforcement de sortie. Ce problème est abordé aux § 1.4.2. et 3.1.3.

g) Le conducteur sort du tunnel



Les conditions spatiales sont celles que le conducteur connaissait avant l'entrée du tunnel. L'œil doit achever sa réadaptation aux luminances élevées et ainsi la traversée du tunnel sera physiologiquement "oubliée" par la rétine.

1.1.3.3. Conclusion

Les phénomènes décrits ici l'ont été de manière qualitative ; on doit pouvoir les maîtriser au mieux afin d'éclairer suffisamment pour que le critère défini par la "tâche visuelle" soit toujours respecté.

Il convient donc d'aborder le problème de manière quantitative, c'est le but du paragraphe suivant.

1.2. NOTIONS THEORIQUES FONDAMENTALES

1.2.1. Notions élémentaires

Les quelques notions nécessaires sont rappelées brièvement ici, le paragraphe suivant ne se substitue pas à un cours d'éclairage.

1.2.1.1. Flux lumineux, éclairement, luminance

Dans tout ce document, nous nous intéresserons aux grandeurs photométriques relatives au rayonnement c'est-à-dire évaluées selon l'impression visuelle produite par celui-ci. Ceci est possible grâce à l'efficacité lumineuse spectrale relative $V(\lambda)$.

Sur un plan purement physique, il serait logique de prendre comme unité fondamentale le "watt lumineux" (un watt lumineux de rayonnement de longueur d'onde étant équivalent à $V(\lambda)$ watt énergétique). Historiquement, la photométrie étant très antérieure aux mesures spectroradiométriques, les unités utilisées ne dérivent pas du watt lumineux mais de la candéla (unité d'intensité lumineuse). Elle est 683 fois plus petite que le "watt lumineux par stéradian".

– Le flux lumineux est la grandeur caractéristique d'un flux énergétique (qui est une puissance, exprimée en watts) représentant son aptitude à produire une sensation lumineuse.

Il s'exprime en lumen et est représentatif de la puissance lumineuse d'une source de lumière.

Formule de définition :

$$\Phi = K_m \int_{\lambda(\text{visible})} \Phi_{(e,\lambda)} V(\lambda) d\lambda$$

avec :

Φ : flux lumineux (lm)

$\Phi_{(e,\lambda)}$: flux énergétique à la longueur d'onde λ .(W).

$V(\lambda)$: efficacité lumineuse spectrale relative

$K_m = 683 \text{ lm/W}$: coefficient de passage de l'énergie à son effet visuel en vision photopique.

– L'éclairement reçu par une surface est le quotient du flux lumineux arrivant sur cette surface par l'aire de cette surface. Il est exprimé en lux (lumen par m^2).

On voit que l'éclairement ne fait pas intervenir les caractéristiques de la surface sur laquelle il est mesuré.

On peut dire que l'éclairement est représentatif de la "puissance lumineuse arrivant sur une surface".

– La luminance en un point de la surface éclairée, dans la direction d'observation considérée, est le quotient du flux lumineux **quittant** cette surface en ce point et se propageant dans des directions définies par un cône élémentaire contenant la direction donnée, par le produit de l'angle solide du cône et de l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée.

La luminance s'exprime en cd/m^2 (ou en $\text{Lumen}/\text{m}^2\text{sr}$). Il faut remarquer que la luminance est représentative du flux lumineux provenant de la surface regardée et reçu par un élément de surface de la rétine de l'observateur.

La luminance fait donc intervenir les caractéristiques photométriques de la surface. Par exemple, une page noire et une page blanche placées côte à côte reçoivent le même éclairement mais l'une a une luminance très supérieure à l'autre car elle "renvoie" beaucoup plus de lumière ; l'œil la perçoit très claire et l'autre très sombre. Cet exemple évident montre que l'œil n'est pas sensible aux éclairements mais aux luminances.

Lorsque nous regardons des surfaces, nous comparons leur clarté par analyse des luminances. Cette notion est d'une importance extrême car une étude basée sur la visibilité devra prendre en compte les luminances des surfaces et non l'éclairement arrivant sur ces surfaces.

1.2.1.2. Couleur

Il est nécessaire à ce stade de l'exposé d'introduire les couleurs des surfaces.

Exemple :

Deux pages présentant la même luminance peuvent être perçues de manière tout à fait différente pour l'œil si leurs couleurs sont différentes. L'étude des couleurs permet de définir une notion de contraste de couleur évidemment très importante pour la perception.

Cependant, aucune étude concernant la visibilité en tunnel ne tient compte de cette notion pour la raison suivante :

L'emploi de sources monochromatiques n'est pas interdit et rend les contrastes de couleur quasiment nuls.

D'autre part, nous verrons que le problème de l'étude des contrastes de luminances étant déjà très ardu, les notions de colorimétrie ne sont actuellement abordées par aucun spécialiste de l'éclairage des tunnels.

1.2.1.3. Conclusions

Les études concernant la visibilité ne tiendront compte que des luminances. On verra qu'elles conduisent à une valeur de luminance jugée nécessaire en chaque point de la chaussée du tunnel.

Pour le projecteur, il est beaucoup plus facile d'utiliser les éclairagements qui sont directement reliés au coût d'une installation d'éclairage. Le passage des luminances aux éclairagements est le sujet du § 1.9.

1.2.2. *Tâche visuelle : traduction en termes de luminances*

La tâche visuelle retenue dans tout le guide est la visibilité d'obstacles. En effet le C.E.Tu. ne saurait trop conseiller ce choix sécuritif.

D'après ce qui a été dit précédemment, voir un obstacle sur une chaussée, c'est percevoir une différence entre sa luminance et celle de la chaussée.

Cette notion est prise en compte par le contraste de luminances :

Si L_o est la luminance de l'objet dans la direction d'observation, L_f la luminance de la chaussée immédiatement autour de l'objet dans la même direction d'observation, on définit le contraste intrinsèque de luminances par :

$$C_{int} = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

On verra l'importance de la notion de contraste **intrinsèque** qui est mesuré dans la direction d'observation mais à une distance très faible de l'objet.

Plusieurs cas sont donc possibles :

1° $L_o > L_f$

C_{int} est positif, l'objet se détache en clair sur fond sombre

2° $L_o < L_f$

C_{int} est négatif, l'objet se détache en sombre sur fond clair.

3° $L_o = L_f$

C_{int} est nul ; il n'y a aucun contraste et l'objet ne se détache absolument pas.

En fait nous verrons qu'il ne suffit pas que C_{int} soit différent de zéro pour que l'objet soit perçu lorsque nous introduirons la notion de contraste de seuil.

Plus la valeur absolue de C_{int} sera grande, mieux on verra l'objet.

Cette approche de la vision n'est cependant pas suffisante car on a vu au § 1.1. que s'ajoutent des phénomènes tels que l'éblouissement, le défaut d'adaptation temporelle, etc. qui réduisent très sensiblement les capacités de perception.

Il importe donc de quantifier ces phénomènes dont certains influent directement sur le contraste intrinsèque C_{int} .

1.2.3. *Luminance rétinienne et contraste rétinien*

1.2.3.1. *Vision centrale – Vision périphérique*

La vision centrale est celle qui permet des performances visuelles élevées (reconnaissance de formes, lecture.). Elle correspond à l'image d'un champ de 1,5° environ sur la partie la plus sensible de la rétine : la fovéa centralis (ou fovéa).

La détection et la reconnaissance d'obstacles sur la chaussée ne peuvent se faire qu'en vision centrale.

L'hypothèse de l'utilisateur fixant le point d'attention entraîne donc que la partie de chaussée intéressée soit constamment fixée par la fovéa.

La vision périphérique est un complément indispensable à la vision centrale. On imagine mal en effet une vision à travers un "tuyau" de moins de deux degrés. Grâce à la vision périphérique (qui est l'image du champ bordant le champ central) nous avons les notions de mouvement et nous évoluons facilement, "sans œillères".

Si un mouvement ou un détail est perçu en vision périphérique, une reconnaissance parfaite du phénomène ne pourra être faite qu'en vision centrale, par un pivotement de l'œil, voire de la tête si nécessaire.

L'œil en attention diffuse effectue de nombreux mouvements (plusieurs par seconde). L'attention soutenue par contre diminue considérablement le nombre et l'amplitude de ces saccades (d'où l'expression : "fixer son regard").

1.2.3.2. Luminance et contraste rétinien

On a vu que l'œil était sensible aux luminances. On peut aller maintenant plus loin dans la compréhension du mécanisme physiologique de la vision.

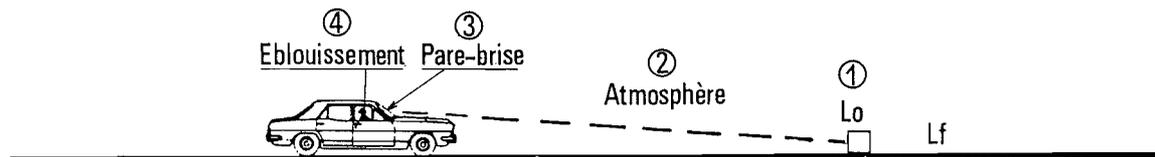
La fovéa entraîne une sensation visuelle uniquement conditionnée par les photons qu'elle absorbe et sans ségrégation en fonction de l'origine de ces photons. Le contraste réellement perçu par l'œil sera donc fonction des luminances L_{oR} et L_{fR} (respectivement de l'objet regardé et de la chaussée environnante) arrivant sur la fovéa, et qui ne sont pas forcément égales à L_o et L_f comme nous allons le montrer.

Nous définissons donc un contraste rétinien des luminances rétiniennes L_{oR} et L_{fR} .

$$C_{ret} = \frac{L_{oR} - L_{fR}}{L_{fR}}$$

Comment évaluer L_{oR} et L_{fR} ?

Pour bien comprendre le phénomène, regardons ce qui se passe sur le trajet optique [obstacle, œil du conducteur] :



L'observation de l'obstacle s'effectue à travers une couche d'air qui n'est **jamais** parfaitement limpide, l'observateur est derrière un pare-brise qui "filtre" la lumière et enfin, avant d'entrer dans le tunnel l'œil est ébloui par l'ambiance lumineuse extérieure :

On peut quantifier ces gênes de la manière suivante :

Étape 1 : contraste intrinsèque

$$C_{int} = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

C_{int} est mesuré dans la direction de l'observation mais suffisamment près de l'objet pour que l'on néglige l'épaisseur de la couche d'air.

Étape 2 : Traversée de l'atmosphère

Les luminances L_o et L_f subissent un amoindrissement car le facteur de transmission de l'atmosphère (T_{atm}) est inférieur à 1. De plus, la couche d'air non limpide éclairée possède une luminance (L_{atm}) qui s'ajoute à L_o et L_f .

On a (donc)

$$L_f \text{ (étape 2)} = L_f T_{atm} + L_{atm}$$

$$L_o \text{ (étape 2)} = L_o T_{atm} + L_{atm}$$

$$C \text{ (étape 2)} = \frac{(L_o - L_f) T_{atm}}{L_f T_{atm} + L_{atm}} = C_{int} \frac{T_{atm} L_f}{L_f T_{atm} + L_{atm}}$$

Etape 3 : Traversée du pare-brise :

De même que la couche d'air, le pare-brise a une certaine luminance (forte s'il est éclairé violemment, faible s'il est dans l'ombre) et un certain facteur de transmission; d'où les nouveaux paramètres :

$$L_f \text{ (étape 3)} = (L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB}$$

$$L_o \text{ (étape 3)} = (L_o T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB}$$

$$C \text{ (étape 3)} = \frac{(L_o - L_f) T_{atm} T_{PB}}{(L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB}} = C_{int} \frac{T_{atm} T_{PB} L_f}{(L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB}}$$

Etape 4 : Traversée de l'œil et arrivée sur la fovéa : explication du défaut d'adaptation spatiale.

L'œil est souvent comparé à un appareil photographique et a les mêmes défauts que celui-ci : des diffusions et réflexions parasites.

Le schéma de la figure 1 permet de comprendre aisément les raisons de l'éblouissement :

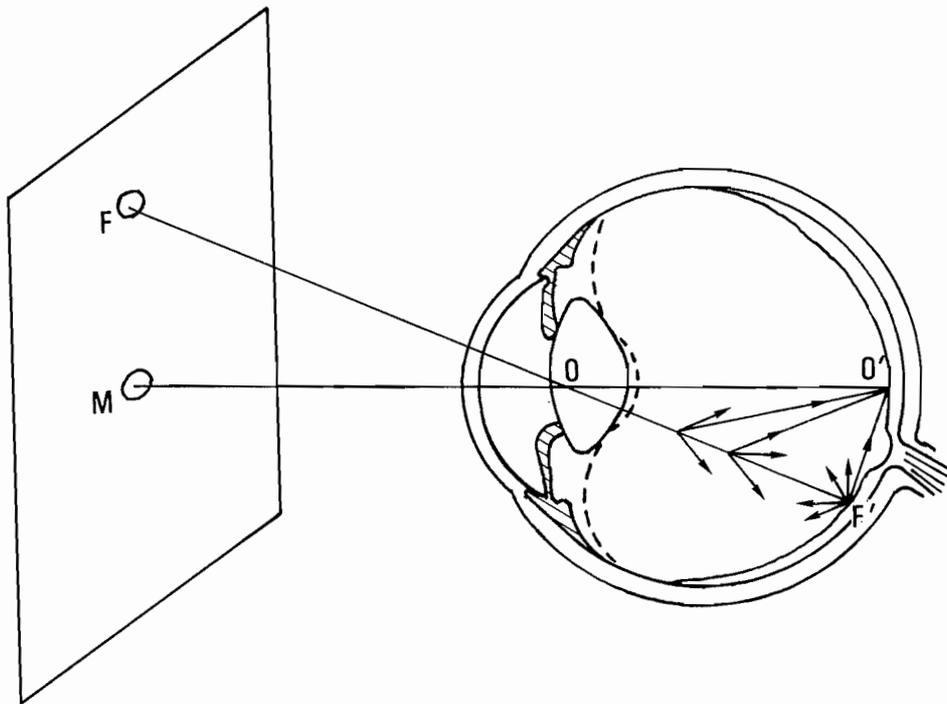


Fig. 1 – Explication de l'éblouissement.

La vision centrale (dans un angle de $1,5^\circ$ environ) est assurée par la fovéa (point O'), l'image du point M est donc située sur O' .

Mais la lumière issue d'un point F éloigné de M est diffusée par le milieu ac aqueux remplissant l'œil. Une partie de cette lumière diffusée arrive sur la fovéa.

D'autre part, en F' , la rétine réfléchit environ 80 % de la lumière reçue dont une partie est dirigée vers O' . Ces diffusions et réflexions parasites sont additives. La luminance de voile L_f existe donc **TOUJOURS** mais n'est perçue que lorsqu'elle est suffisamment importante pour perturber la visibilité.

Tout se passe comme si, pour une luminance L de champ central, on avait, au niveau de la fovéa, la luminance $L + L'$, L' étant le résultat de l'action de toutes les sources lumineuses situées dans le champ périphérique. La luminance L' est dite luminance de voile parasite due à l'éblouissement. Elle existe toujours mais n'est perçue que lorsqu'elle est suffisamment importante pour perturber la visibilité.

Elle a été plus particulièrement étudiée par une équipe de chercheurs dirigée par FRY et porte parfois le nom de luminance de voile de FRY ou plus simplement voile de FRY. Nous la noterons L_f dans tout ce qui suit.

FRY a apporté une contribution essentielle à l'étude de l'éblouissement car il a :

- Trouvé une formule de calcul de L_f en fonction d'une distribution quelconque de luminances dans le champ périphérique.
- Conçu un système optique qui, adapté à un luminancemètre, donne directement le voile de FRY L_f .

L'étape 4 conduit donc aux valeurs rétiniennes :

$$L_{oR} = (L_o T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB} + L_f$$

$$L_{fR} = (L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB} + L_f$$

$$C_R = C_{int} \frac{T_{atm} T_{PB} L_f}{(L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB} + L_f}$$

Ces valeurs sont les seules importantes pour étudier la visibilité; leur formulation est générale.

Il ne servirait à rien de comparer des situations photométriques différentes si l'on ne prenait pas en compte L_R et C_R , car les résultats obtenus ne seraient ni comparables, ni reproductibles.

Nous allons voir comment on peut utiliser ces variables rétiniennes en leur appliquant des fonctions connues en optique physiologique.

1.2.4. Application à C_R et L_R de fonctions particulières

1.2.4.1. La "Relative Contrast Sensitivity" (R.C.S.) (3)

Le but de l'utilisation de cette "fonction" est d'essayer d'établir une liaison entre la réalité et les simulations, afin d'exploiter in situ une grande quantité de résultats obtenus au laboratoire. Le concept de RCS est donc plus particulier que celui de variables rétiniennes. Nous essayons d'en donner un aperçu en évitant de rentrer dans les détails, car ce seul sujet fait l'objet d'une publication très complète de la CIE (publication n° 19, février 1972) (3).

a) Etude de la RCS au laboratoire

L'idée de départ est de définir une expérience de visibilité d'un objet de luminance uniforme se détachant sur un fond de luminance uniforme.

Les dimensions de l'objet sont variables mais le diamètre apparent reste limité à un maximum de l'ordre de 10 minutes d'angle. On peut faire varier un certain nombre de paramètres tels que la forme de l'objet, l'âge de l'observateur, la taille de l'objet, le temps laissé à l'observateur pour voir l'objet, etc.

D'une façon générale, et toutes choses égales par ailleurs, le seuil de visibilité dépend du contraste entre l'objet et le fond ainsi que de la luminance du fond. Si en effet on réduit le contraste objet-fond, il arrive un moment où l'observateur ne distingue plus l'objet qui "ne se détache plus sur le fond". De même, si on réduit progressivement la luminance du fond, sans changer le contraste, il arrive un moment où l'observateur ne distingue plus l'objet "parce qu'il n'y a plus assez de lumière". En répétant ce genre d'expériences un grand nombre de fois et en faisant des statistiques, on peut définir une courbe de visibilité séparant en deux régions le plan dont les axes de coordonnées sont constitués par la luminance du fond en abscisse et le contraste objet-fond en ordonnée. "Au-dessus de la courbe de visibilité, on voit, au-dessous on ne voit pas". La réalité est moins tranchée car la courbe de visibilité étant définie de façon statistique, on peut tracer tout un réseau de courbes : celle au-dessus de laquelle on a 50% de chance de voir, celle au-dessus de laquelle on a 95% de chance de voir, etc.

Les expériences de ce type étant fort nombreuses et variées, la CIE, dans sa publication n° 19, en a répertorié un grand nombre et surtout les a comparées d'une façon systématique grâce à la notion "R.C.S." ou "Relative Contrast Sensitivity". La "R.C.S." n'est pas autre chose que la courbe de visibilité normalisée dans le système d'axes suivant :

- en abscisse, on porte le logarithme de la luminance du fond L_f ;
- en ordonnée, on porte l'inverse du contraste entre l'objet et le fond, soit :

$$\frac{L_f}{|L_f - L_o|}$$

à un facteur multiplicatif près.

Il en résulte qu'on voit au-dessous et qu'on ne voit pas au-dessus de la courbe R.C.S. (L_f).

Le fait très important est que toutes les R.C.S. connues sont très voisines les unes des autres. On peut alors définir une R.C.S. "Standard" correspondant à un cas moyen, qui devrait suffire à rendre compte de la plupart des observations, au moins en première approximation.

Au laboratoire deux "objets" (L_1, C_1) et (L_2, C_2) sont au même seuil de visibilité si l'équation suivante est vérifiée :

$$\frac{\text{R.C.S.} (L_1)}{\text{R.C.S.} (L_2)} = \frac{C_2}{C_1}$$

A titre d'exemple, la figure 2 donne la R.C.S. standard (relative à la vision en 0,2 seconde d'un disque de 4' de diamètre apparent), les figures suivantes montrent les variations par rapport à la R.C.S. standard en fonction des observateurs, de la taille de l'objet, et du temps laissé à l'observateur pour voir l'objet.

Ces figures qui sont extraites du rapport C.I.E. déjà cité, montrent bien que la R.C.S. standard semble suffisante pour décrire les expériences recensées.

On peut l'approcher par la formule mathématique :

$$\text{R.C.S.} (L) = 100 \left[\left(\frac{1,675}{L} \right)^{0,4} + 1 \right]^{-2,5}$$

On observe en effet que les R.C.S. individuelles, telles qu'elles ressortent du rapport C.I.E., semblent superposables par translation à la précision des mesures près. Notre démarche consistera donc, à partir d'une série d'observations in situ, à ajuster la translation permettant de faire passer une courbe R.C.S. par les points observés. On aura ainsi un moyen théorique d'interpoler ou d'extrapoler une série d'observations in situ.

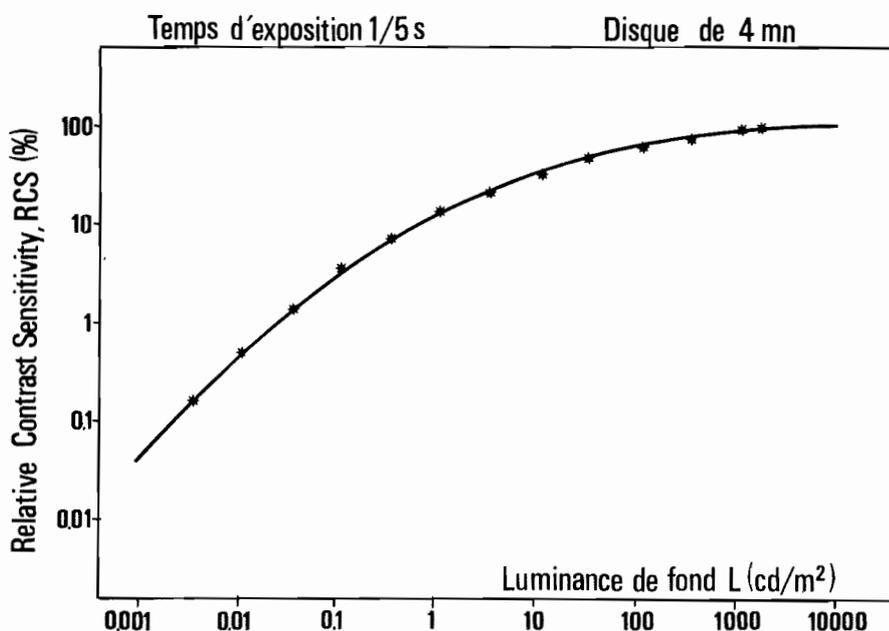


Fig. 2. - Courbe R.C.S. Standard en fonction de la luminance L (d'après Blackwell et Taylor).

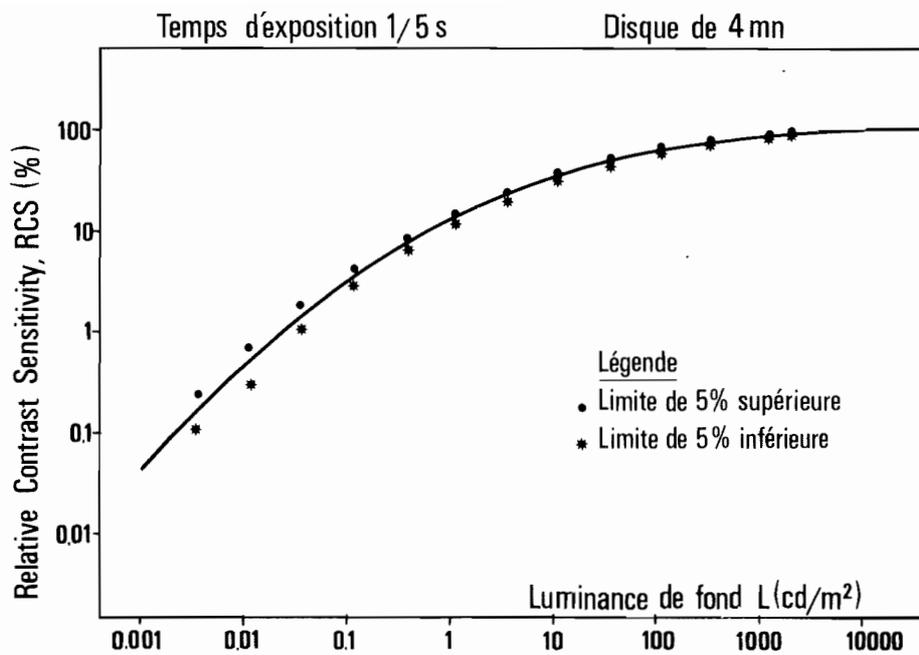


Fig. 3. – Limites de variations pour un groupe de 68 observateurs âgés de 20 à 30 ans.

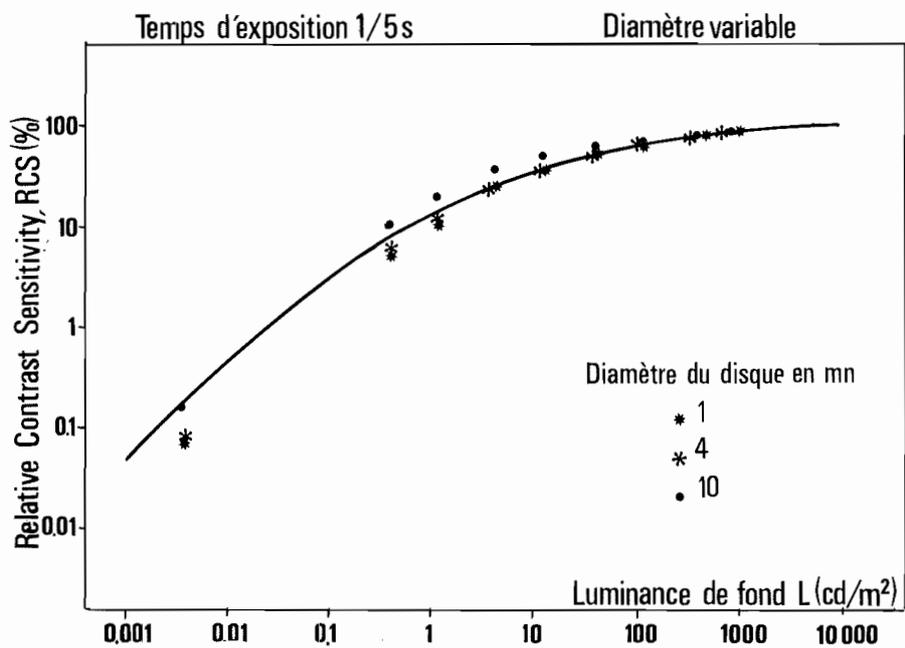


Fig. 4. – Graphique montrant que la R.C.S. dépend peu de la taille de l'objet.

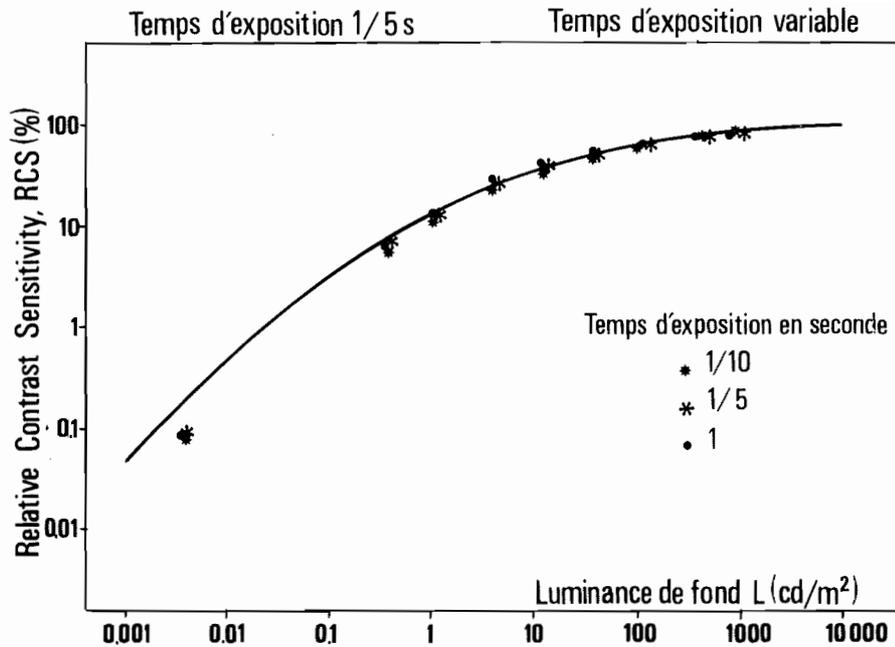


Fig. 5. – Graphique montrant que pour les luminances courantes la R.C.S. dépend peu du temps d'exposition.

b) Application des résultats du laboratoire aux expériences in situ

Comme on l'a vu, la R.C.S. est considérée en l'absence de défaut d'adaptation temporelle comme une courbe de visibilité "universelle", c'est-à-dire dont la forme ne change pratiquement pas lorsque les conditions de l'expérience varient. On a donc voulu utiliser la R.C.S. dans une extrapolation aux conditions réelles beaucoup moins favorables que celles du laboratoire et nous avons dû effectuer une généralisation qui a été vérifiée expérimentalement.

En effet, si l'on applique directement à un paysage non uniforme les résultats obtenus sur fond uniforme, on risque de grossières erreurs. La vision s'effectuant sur la fovéa, on considère comme fond uniforme la chaussée entourant l'obstacle à la distance d'arrêt. L'influence du champ périphérique est prise en compte par le voile de FRY.

Nous définissons alors, selon une approche similaire à celle de BODMANN (4) une R.C.S. "rétinienne" ou R.C.S.R. décrivant le seuil de visibilité en fonction des variables rétiniennes C_R et L_R .

Nous posons, pour une luminance de champ central L arrivant "aux portes de l'œil" et pour une luminance de voile de FRY L_F : R.C.S.R. (L_R) = RCS (L) avec évidemment $L_R = L + L_F$.

Dans le cas d'un fond uniforme, le voile de FRY L_F est égal à 0,07 L , on a donc R.C.S.R. (L_R) = R.C.S.R. (1,07 L), on a l'équivalence complète suivante entre R.C.S.R. et R.C.S. :

$$\text{R.C.S.R. (1,07 } L) = \text{R.C.S. (} L)$$

Dans le cas d'un fond non uniforme, cela généralise la notion de R.C.S., l'influence du fond non uniforme sur la visibilité étant prise en compte par le voile de FRY. Cette généralisation a été vérifiée par des expériences in situ. On peut donc écrire que deux "objets" (L_{R1} , C_{R1}) et (L_{R2} , C_{R2}) sont au même seuil de visibilité si :

$$\frac{\text{R.C.S.R. (} L_{R1})}{\text{R.C.S.R. (} L_{R2})} = \frac{C_{R2}}{C_{R1}}$$

soit avec :

$$L_{R1} = L_1 + L_{F1}$$

$$L_{R2} = L_2 + L_{F2}$$

$$\frac{\text{R.C.S. (} L_1)}{\text{R.C.S. (} L_2)} = \frac{C_{R2}}{C_{R1}}$$

1.2.4.2. Loi de RICCO (5, 6)

a) Au laboratoire

Nous avons vu, avec la R.C.S., comment corréler la luminance de fond et le contraste de seuil de visibilité. Bien que la forme de la R.C.S. ne varie pas en prenant différents tests de visibilité, les valeurs obtenues changent. Il est donc important de faire intervenir la dimension de l'obstacle vu à la distance d'arrêt.

Il est en effet compréhensible qu'une petite cible très contrastée soit au seuil de visibilité à la même distance qu'un gros panneau peu contrasté. Nous utilisons la loi de RICCO connue depuis fort longtemps au laboratoire (1871).

Tout comme la R.C.S., elle est valable, en l'absence de défaut d'adaptation temporelle, pour un objet de luminance uniforme se présentant sur un fond de luminance uniforme. Elle relie le diamètre apparent ϵ du test à son contraste C , la luminance du fond restant constante. BLACKWELL a étendu l'étude à une grande plage de variation des diamètres apparents. L'allure de la courbe $\epsilon = f(C)$ est donnée en figure 6 en diagramme log, log (logarithmes décimaux).

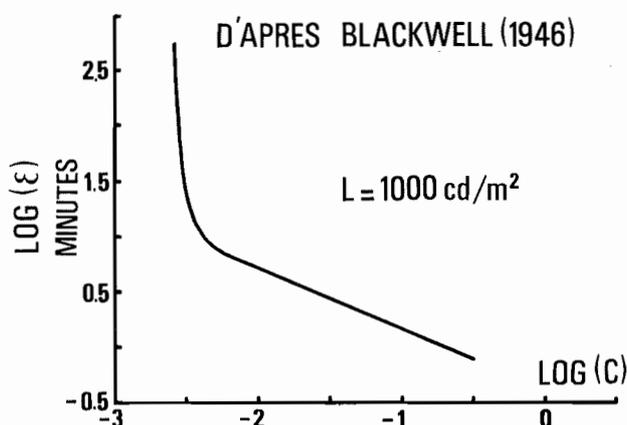


Fig. 6. – Relation entre le contraste et le diamètre apparent d'un objet au seuil de visibilité, pour une luminance fixée à 1000 cd/m^2 [d'après (5) et (6)]

La loi de RICCO est la partie linéaire du diagramme, elle concerne les diamètres apparents inférieurs à 10' et s'applique donc à l'ensemble des obstacles usuels rencontrés par un automobiliste circulant à une vitesse "normale".

pour $\epsilon < 10'$: $C \epsilon^2 = \text{constante}$
à luminance de fond constante.

b) application à la situation réelle

De même que pour la R.C.S., on extrapole à une expérience sur fond non uniforme la loi de RICCO : sur fond uniforme, il est strictement équivalent d'écrire $C \epsilon^2 = \text{constante}$ et $C_R \epsilon^2 = (\text{constante})'$. Sur fond non uniforme $C_R \epsilon^2 = \text{cste}$ est une généralisation qui a été vérifiée par des essais in situ.

Concrètement, la loi de RICCO indique qu'au seuil de visibilité on peut, toutes choses égales d'ailleurs (en particulier à luminance de fond constante), échanger du contraste contre du diamètre apparent des objets selon le ratio $C = K D^2$, K étant une constante dépendant des conditions d'ambiance.

On peut utiliser ce résultat de la manière suivante :

– deux "objets" $(L_R, C_{R1}, \epsilon_1)$ et $(L_R, C_{R2}, \epsilon_2)$ sont au seuil de visibilité,

$$C_{R2} \epsilon_2^2 = C_{R1} \epsilon_1^2$$

et donc "l'objet" $(L_R, C_{R2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^2, \epsilon_1)$

n'est autre que "l'objet" $(L_R, C_{R1}, \epsilon_1)$

1.2.5. *Défaut d'adaptation temporelle*

Comme on l'a vu, le défaut d'adaptation temporelle intervient en même temps que le défaut d'adaptation spatiale, lorsque le point d'attention pénètre dans la zone de chute brutale de la luminance de chaussée.

La prise en compte simultanée des deux phénomènes est très délicate et sujette à caution. Nous avons eu une démarche différente : dans un premier temps, l'adaptation spatiale est seule prise en compte et conduit à une certaine valeur de luminance à obtenir sur la chaussée du tunnel, dans un deuxième temps, on vérifie si cette valeur obtenue suffit à contrecarrer le défaut temporel. On augmente le niveau aux endroits où cela s'avère nécessaire.

Cette méthode de résolution en deux temps nous a paru la seule capable de ne pas mélanger les deux phénomènes qui, bien que se produisant simultanément, sont de nature très différente.

Un paragraphe spécial est consacré au défaut d'adaptation temporelle et à sa prise en compte dans notre méthodologie : c'est le § 1.4.2.

1.2.6. *Equation fondamentale de visibilité*

Cette équation va nous permettre d'assurer les mêmes seuils de visibilité pour un usager confronté à des situations aussi variables que l'approche d'un tunnel en plein jour ou le passage en section courante de l'ouvrage.

Elle est basée sur les notions très générales de variables rétinienne et sur celles plus particulières des lois R.C.S. et de RICCO ; **elle néglige donc le défaut d'adaptation temporelle qui sera pris en compte dans un deuxième temps.**

Enoncé de l'équation fondamentale :

Si deux "objets" $(L_{R1}, C_{R1}, \varepsilon_1)$ et $(L_{R2}, C_{R2}, \varepsilon_2)$ sont simultanément au seuil de visibilité, l'objet $(L_{R2}, C_{R2} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^2, \varepsilon_1)$

est également au seuil de visibilité (d'après la loi de RICCO) et l'on peut appliquer la "relation R.C.S." aux "objets" de même diamètre apparent $(L_{R1}, C_{R1}, \varepsilon_1)$

et $(L_{R2}, C_{R2} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^2, \varepsilon_1)$

soit :

$$\frac{\text{R.C.S.R. } (L_{R2})}{\text{R.C.S.R. } (L_{R1})} = \frac{C_{R1}}{C_{R2}} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)^2$$

La variation de diamètre apparent est surtout intéressante lorsqu'elle est prise en compte via la distance d'arrêt. Le même obstacle présent sur la chaussée devra être vu plus ou moins loin suivant la vitesse de l'usager. On remplace donc, dans l'équation fondamentale

$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ par $\frac{D_2}{D_1}$, D_1 et D_2 étant des distances d'arrêt.

L'équation devient :

$$\frac{\text{R.C.S.R. } (L_{R2})}{\text{R.C.S.R. } (L_{R1})} = \frac{C_{R1}}{C_{R2}} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

Nous avons écrit l'équation fondamentale d'équivalence de visibilité strictement valable en l'absence de défaut d'adaptation temporelle et pour des fonds uniformes, extrapolée au cas de fonds non uniformes.

Cette équation n'est donc pas "universelle" et ne constitue qu'une approximation du problème. Elle est entre autres liée à l'hypothèse de départ postulant que le conducteur fixe son regard sur la chaussée à la distance d'arrêt devant lui, et donc néglige les mouvements de l'œil autour de l'axe considéré.

Comme on l'a montré, toutes ces simplifications sont indispensables si l'on veut appliquer les fonctions citées. Même si cette équation n'est qu'une approximation du cas réel, elle est beaucoup plus performante que la plupart des simulations effectuées jusqu'ici en laboratoire, justement sur fond uniforme avec en sus une interprétation beaucoup plus sujette à caution de l'influence du champ périphérique sur la vision centrale.

Nous considérons donc que la méthode actuelle, même si elle ne fait qu'approcher la solution du difficile problème de vision à la traversée des tunnels routiers, constitue un progrès par rapport aux méthodes précédemment employées.

1.3. VERIFICATION DE L'EQUATION

1.3.1. Remarque préliminaire

L'éclairage des tunnels routiers est un problème très particulier. Les utilisateurs de ce guide sont sinon des spécialistes, du moins des responsables d'opération.

Il peut arriver, notamment au moment des essais de réception, qu'il apparaisse opportun d'entreprendre des essais de visibilité. C'est pourquoi nous exposons, dans ce paragraphe, non seulement des résultats, mais surtout la méthode à employer.

Nous espérons que, d'une façon ou d'une autre, d'autres investigations directement comparables permettront d'augmenter les connaissances sur le sujet, les essais in situ étant jusqu'à présent beaucoup plus rares que les simulations en laboratoire.

1.3.2. Vérification expérimentale

Il est commode d'écrire la formule fondamentale sous la forme :

$$\frac{R.C.S.R. (L_R) C_R}{D^2} = \text{cste ou encore}$$

$$D = \text{cste} \sqrt{R.C.S.R. (L_R) C_R}$$

Il s'agit donc de mesurer simultanément D, C_R et L_R dans des conditions aussi variées que possible, afin de voir si ces trois quantités sont bien reliées par la relation précédente.

Nous rappelons que :

$$L_R = (L_f T_{atm} + L_{atm}) T_{PB} + L_{PB} + L_f$$

$$C_R = C_{int} \frac{L_f T_{atm} T_{PB}}{L_R}$$

1.3.2.1. Impératifs à respecter

a) Dispersion statistique des mesures

La méthode de mesure doit limiter autant que faire se peut la dispersion statistique des résultats. Le choix du test de vision a donc une importance primordiale. A l'origine, le cube de 20 cm de côté préconisé par la C.I.E. avait été adopté. Les résultats étaient plutôt dispersés, notamment en raison de la difficulté d'apprécier la luminance L_f du fond constitué par la chaussée vue sous une incidence rasante à la distance de visibilité. Une amélioration sensible a été apportée en simulant la chaussée par un panneau vertical gris mat présentant une luminance du même ordre de grandeur que celle d'une chaussée vue sous incidence rasante. Le cube était remplacé par un carré de contre-plaqué accroché au panneau.

Cette disposition réduit la dispersion pour les raisons suivantes :

- Le contraste intrinsèque est mieux connu : la mesure de L_f sur un panneau vertical est facile et précise, contrairement à une mesure de luminance de chaussée sous incidence rasante.
- L'observateur qui voit le fond de très loin est en attention soutenue et guette le moment où l'objet va se détacher sur le panneau.

Une impression subsistait : les observateurs avaient tendance à hésiter avant de dire s'ils avaient vu le test et attendaient de percevoir les coins du carré pour le faire.

Or, par définition, dans une mesure relative à un seuil de visibilité, l'observateur doit juste décider s'il voit ou non l'objet, sans rien reconnaître de sa forme. Le carré de 20 cm de côté a donc été remplacé par un cercle de 20 cm de diamètre qui donne les meilleurs résultats. Il restait une dernière anomalie : aux très faibles contrastes, l'observateur voyait le test bien mieux que la loi de RICCO ne le laissait supposer. Ceci était dû à l'épaisseur du contre-plaqué qui créait un effet de contour. L'emploi de disques en papier a supprimé ce phénomène.

Enfin, on ne plaçait sur le panneau qu'un disque à la fois. Or, la fiabilité des mesures réside en grande partie dans la célérité à les effectuer, afin que les conditions photométriques ne varient pas trop. La connaissance de la distance D étant de nature statistique, plusieurs passages (au moins 5) sont nécessaires pour tracer un point moyen sur le diagramme de RICCO. Ainsi, l'obtention de 4 points nécessitait au moins 20 passages et donc une manipulation assez longue nous exposant aux variations des conditions atmosphériques et de l'état de fatigue des observateurs. Ce qui risquait d'entraîner une chute de l'acuité visuelle et donc un écart par rapport à la loi de RICCO (qui demande un observateur d'acuité constante). C'est pourquoi l'on a jugé préférable de disposer simultanément quatre disques de contrastes variés sur le fond. De cette façon, on a, à chaque passage, 4 mesures de D au lieu d'une. Pour un même nombre de points sur le diagramme, on divise le temps de l'expérience par 4 et l'éventuelle variation due à la fatigue est répartie entre les différentes distances de visibilité (elle est d'ailleurs beaucoup moins grande en raison de la diminution sensible du temps total nécessaire d'attention soutenue). Le seul inconvénient à craindre était l'interaction possible des différentes cibles mais les résultats obtenus n'ont rien révélé de tel.

Cette méthode des 4 disques en papier de contrastes différents sur un fond vertical uniforme donne pour l'instant les meilleurs résultats.

b) Variations incontrôlées de l'environnement lumineux

On a vu que l'œil fonctionne de manière quasiment constante dans une plage énorme de luminance. Une faible variation des conditions d'ambiance lumineuse ne sera pas perçue par les observateurs, mais elle influencera énormément les résultats. En effet, un léger passage nuageux devant le soleil peut fausser d'une façon importante la mesure du contraste rétinien.

Il est donc nécessaire d'opérer rapidement et par beau fixe pour toutes les campagnes d'essais in situ. Cela suppose que l'on soit prêt en permanence à "profiter" des rares journées de ciel absolument pur. Nous allons voir que d'autres impératifs pratiques ont nécessité des procédés particuliers.

1.3.2.2. Méthode employée

La formule générale ne s'applique pas qu'aux tunnels, mais ce sont ces derniers qui intéressent plus particulièrement le C.E.Tu.

Nous avons effectué une approche en deux temps, car il ne nous était pas facile d'organiser des essais de visibilité à l'entrée d'un tunnel.

Première phase : Expérimentation de la méthode sur un "trou noir artificiel".

Devant les difficultés rencontrées dans la recherche d'un site favorable à nos essais, nous avons détourné momentanément le problème en utilisant une fourgonnette dont l'intérieur était peint en noir. Cet équipement simple a rendu de grands services car en plaçant le panneau avec ses disques successivement en pleine lumière (à l'extérieur du véhicule), et dans le fond du "trou noir", nous avons effectué des essais balayant une large plage de luminances.

Une fois les premiers résultats obtenus, nous sommes passés à la phase suivante.

Deuxième phase : Essais sur un tunnel

Nous avons effectué des essais sur un tunnel en plaçant le panneau à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouvrage.

1.3.2.3. Mesures des différents paramètres

Il s'agit de mesurer les paramètres permettant de calculer le contraste rétinien et la luminance rétinienne.

Les formules qui nous intéressent sont les suivantes :

$$C_R = C_{int} \frac{L_f T_{atm} T_{PB}}{L_f T_{atm} T_{PB} + L_{atm} T_{PB} + L_f + L_{PB}}$$

$$L_{fR} = L_f T_{atm} T_{PB} + L_{atm} T_{PB} + L_{PB} + L_f$$

a) Mesure de C_{int}

L_o et L_f sont mesurées au luminancemètre en se plaçant à quelques mètres du panneau, dans la direction d'observation de l'automobiliste.

La surface du panneau et des disques suit autant que possible la loi de LAMBERT (peinture mate). De petites variations dans la direction d'observation n'introduisent qu'une erreur négligeable.

b) Mesure de L_{PB}

On place le véhicule d'essais sous éclairage ambiant (soleil) à quelques mètres d'un écran très noir dont on mesure la luminance depuis l'extérieur et l'intérieur du véhicule. La différence des deux termes est L_{PB} . Evidemment cet écran "très noir" est constitué par un panneau noir situé au fond de la camionnette "trou noir".

c) Mesure de T_{PB}

Même processus mais cette fois, l'écran est très lumineux et le pare-brise de la voiture est à l'ombre afin d'éliminer L_{PB} . En pratique T_{PB} est de l'ordre de 0,85 pour un pare-brise non teinté et 0,65 pour un pare-brise teinté.

d) Mesure de L_f

L_f est mesurée directement grâce à une lentille de FRY adaptée à un luminancemètre situé à la place du passager avant du véhicule.

e) Mesure de la distance de visibilité D

Un système asservi aux tours de roues du véhicule d'essais fait dérouler un papier gradué sur une piste d'enregistreur. L'observateur qui voit le test donne un top. Il en donne un deuxième en passant devant le panneau supportant les disques. D est évidemment déterminée par l'intervalle entre les deux tops.

La formule exacte donnant la luminance $\Lambda(D)$ d'un objet quelconque vu à la distance D en milieu homogène est :

$$\Lambda(D) = \Lambda(o) e^{-K D} + L_{atm}^{\infty} (1 - e^{-K D})$$

L_{atm}^{∞} est le voile atmosphérique à l'infini dans la direction d'observation. Pour la mesure de L_{atm} à la distance D , on opère avec un écran très sombre afin d'avoir $\Lambda(o) \approx 0$. En pratique, aux distances qui nous intéressent, on a $\Lambda(D) \approx K L_{atm}^{\infty} D$ car K est de l'ordre de 10^{-5} à $10^{-4} m^{-1}$ pour une atmosphère "normale". On ne peut donc espérer obtenir que la tangente initiale à la courbe $L_{atm}(D)$. Evidemment, on ne peut dissocier dans ces conditions le produit $K L_{atm}^{\infty}$ et l'on ne connaît pas $T_{atm} = e^{-K D}$. En pratique, K étant inférieur à $10^{-4} m^{-1}$, aux distances étudiées on a $e^{-K D} \approx 1$.

Pour vérifier qu'aux faibles distances $D \ll K^{-1}$, $L_{atm}(D)$ était bien représenté par une droite, un certain nombre de précautions ont dû être prises.

Ces précautions viennent du fait, que, comme n'importe quel appareil, les luminancemètres ne sont pas parfaits.

Un luminancemètre parfait aurait une courbe de réponse $X(\Theta)$ égale à 1 à l'intérieur de son angle de mesure et à 0 à l'extérieur : fig. 7a.

Les luminancemètres réels ont des courbes de réponse $X_r(\Theta)$ approchant plus ou moins bien la courbe idéale $X(\Theta)$ précédente, cela à cause des réflexions et diffusions parasites à l'intérieur de l'appareil. Fig. 7b.

Voir à ce sujet K. NARISADA, T. TAKEUCHI et S. KOSAKO (7).

En pratique, ce défaut ne prête pas à conséquence..., sauf dans notre cas où pour mesurer $L_{atm}(D)$ on mesure la luminance d'un écran très sombre et de faible diamètre apparent entouré par un paysage très lumineux.

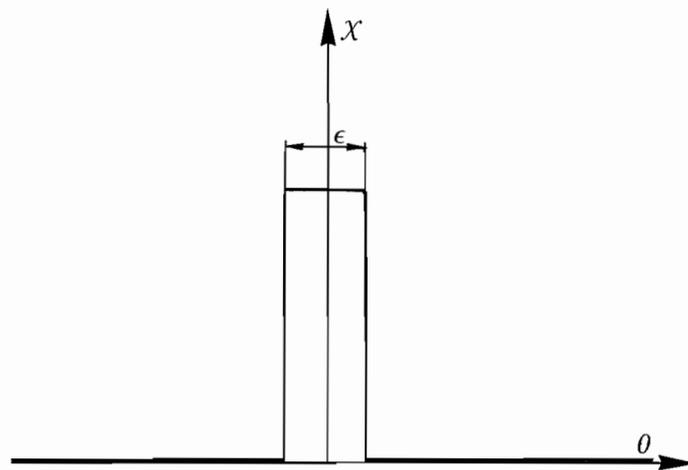


Fig. 7a. – Courbe de réponse $X(\Theta)$ idéale d'un luminancemètre.

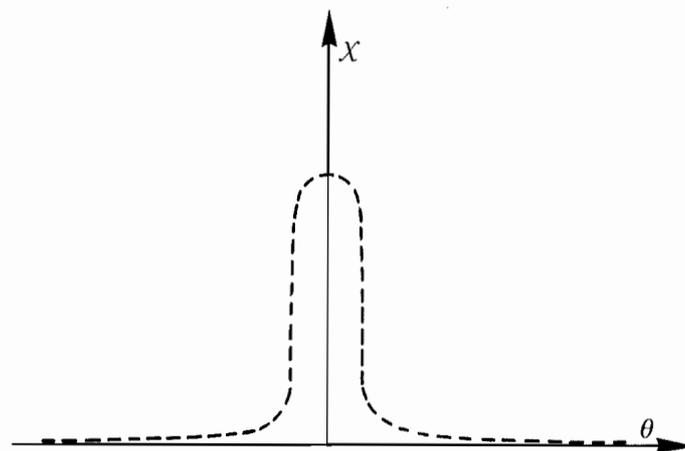


Fig. 7b. – Courbe de réponse $X(\Theta)$ réelle d'un luminancemètre.

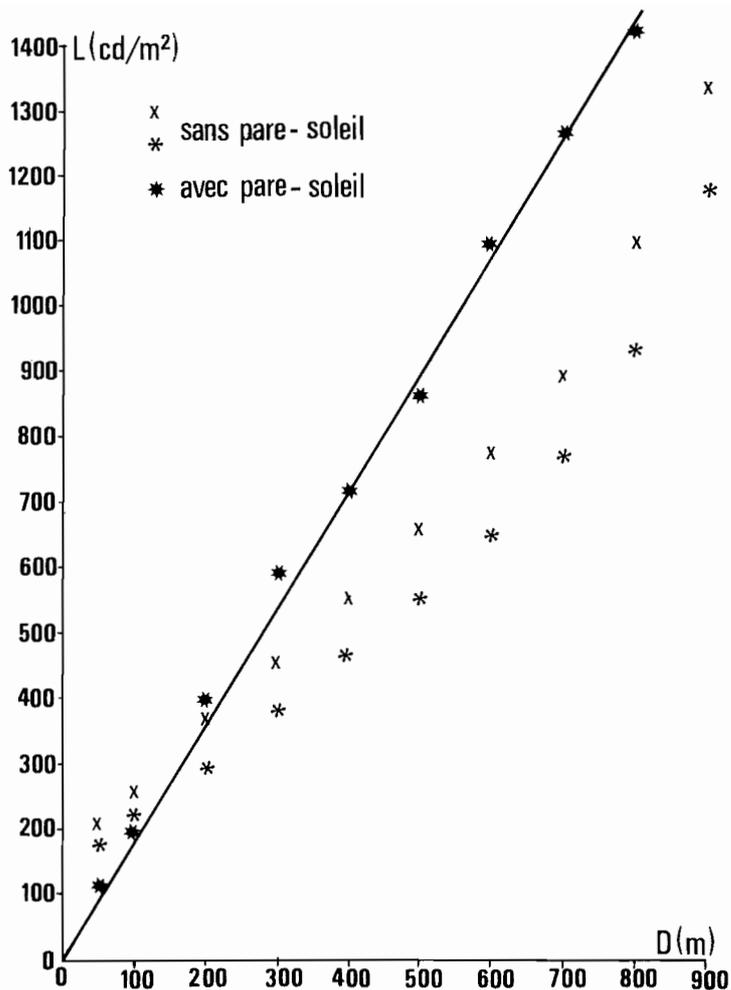


Fig. 8. – Résultats des mesures de voile atmosphérique avec et sans pare-soleil.

Dans ces conditions, il est évident que les ailes de la courbe de réponse $X_r(\Theta)$ peuvent induire une réponse du même ordre de grandeur que la valeur à mesurer.

On peut espérer annuler ce défaut grâce à un pare-soleil vignettant les luminances aussi près que possible à l'extérieur de l'angle de visée, sans toutefois perturber la mesure.

Effectivement on a constaté que les premières mesures, effectuées sans précautions spéciales, s'écartent beaucoup de la loi linéaire attendue.

Après confection d'un pare-soleil de fortune assez encombrant (1 m) les choses rentrent dans l'ordre (fig. 8).

Les mesures ont été effectuées au luminancemètre Massart-Schreder (champ de 3'). Cet appareil muni de son pare-soleil permet facilement de mesurer le voile atmosphérique sur des distances de l'ordre du kilomètre, en visant un écran "noir" de l'ordre de 1 m².

Une fois bien constatée la variation linéaire attendue de $\Lambda(D)$, il suffisait d'un ou deux points de cette courbe pour connaître le voile atmosphérique avec une précision suffisante. Évidemment la difficulté principale consistait en des variations inopinées de ce voile qui ne pouvait être mesuré en permanence.

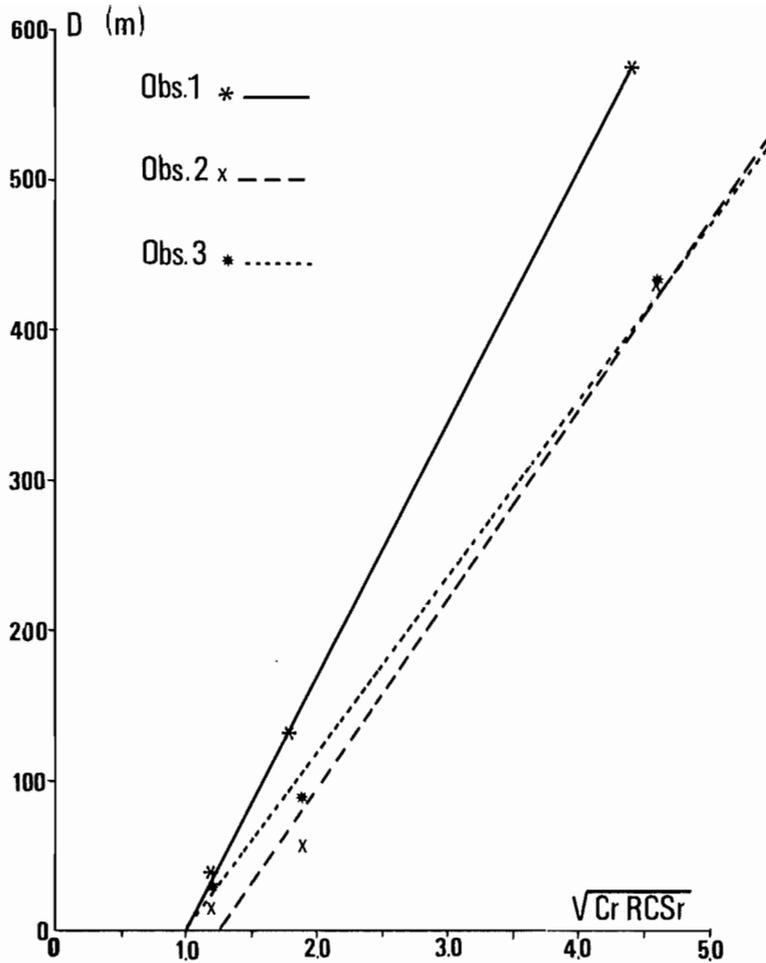


Fig. 10. – Résultats des essais de visibilité de Satolas du 13.08.1980 de 10 h 30 à 11 h 15.
En annexe : mesures et calculs pour ces essais du 13.08.1980.

ANNEXE DE LA FIGURE 10

Luminance de FRY mesurée : 360 cd/m²
Luminance de pare-brise mesurée : 95 cd/m²

Observateur et TEST	D (m)	$L_{atm} + L_f$ (cd/m ²)	$(L_0 - L_f) T_{PB}$ (cd/m ²)	C_R (%)	$L_{FR} - L_F$ (cd/m ²)	$\sqrt{C_R R C S_R} (L_{FR})$	Coordonnées sur le diagramme
I	1	574	457	24,7	483	4,4	(4,4 ; 574)
	2	131	129	4,78	205	1,8	(1,8 ; 131)
	3	39	61	2,17	113	1,2	(1,2 ; 39)
II	1	430	348	27,7	391	4,6	(4,6 ; 430)
	2	57	74	5,2	158	1,9	(1,9 ; 57)
	3	15	42	2,24	131	1,2	(1,2 ; 15)
III	1	434	353	27,6	395	4,6	(4,6 ; 434)
	2	90	97	5	177	1,9	(1,9 ; 90)
	3	31	55	2,2	142	1,2	(1,2 ; 31)

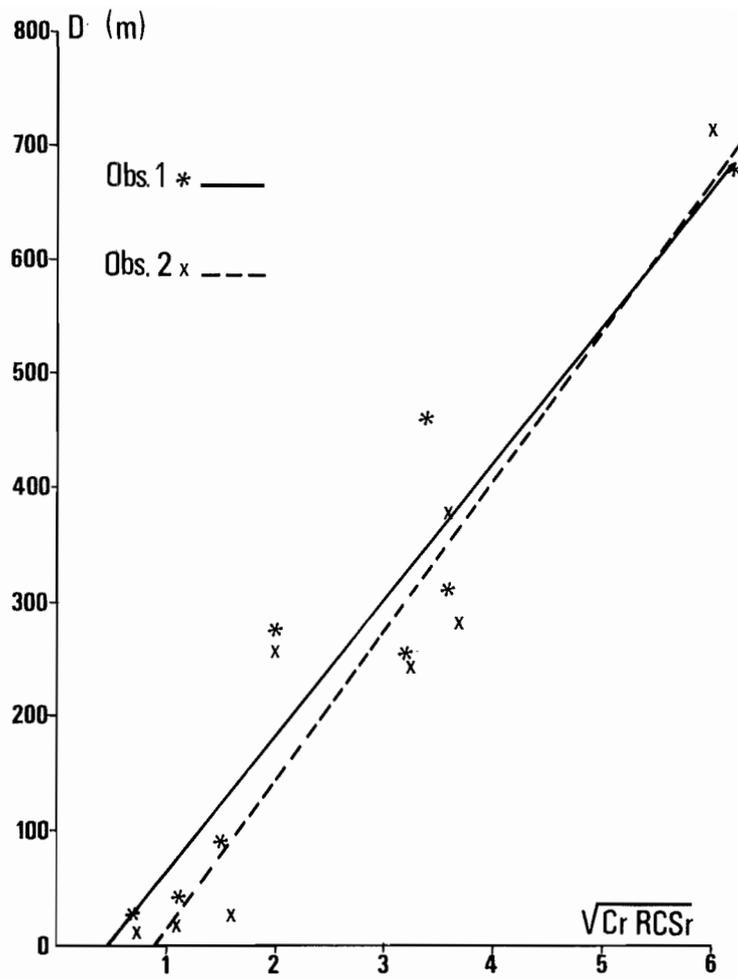


Fig. 11. – Résultats des essais de visibilité de Satolas du 29.08.1980 de 10 heures à 11 h 30.

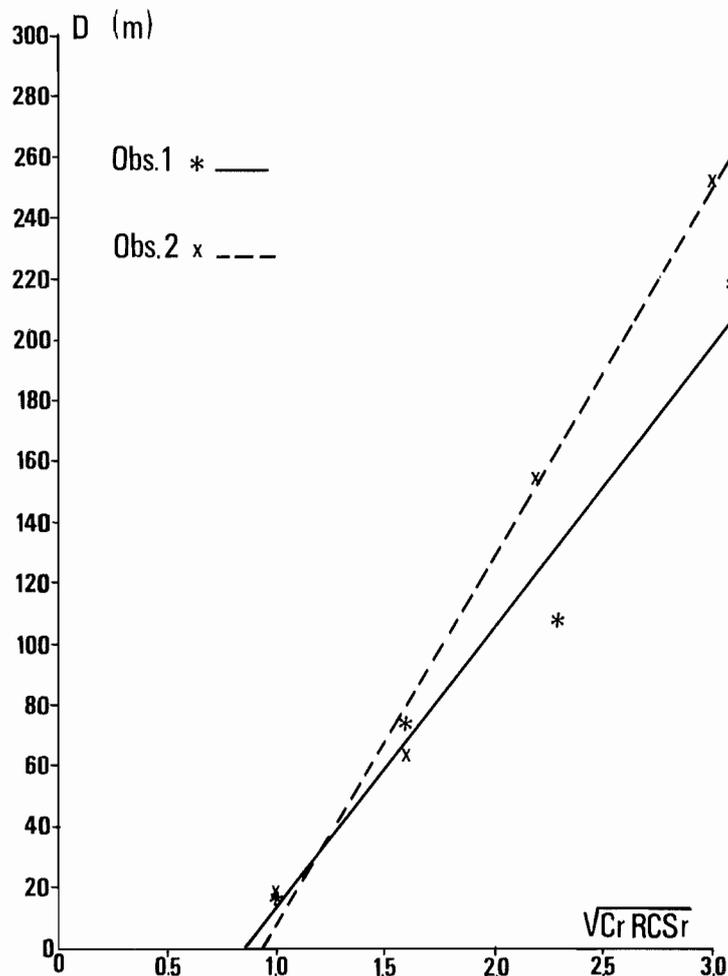


Fig. 12. – Résultats des essais de visibilité de Satolas du 3.09.1980 de 10 h 30 à 11 heures.

D'autre part, suivant que l'on place le panneau à l'intérieur ou à l'extérieur de la fourgonnette, on a une différence très sensible de la luminance du fond vue par l'observateur :

Exemple :

- fond noir dans J7 à 100 m : 150 cd/m^2 ;
- fond clair hors J7 à 100 m : $1\,200 \text{ cd/m}^2$.

Cette forte variation ne trouble en aucun cas les résultats car elle est prise en compte par la R.C.S.R.

Ces premiers résultats obtenus à Satolas nous semblent satisfaisants.

Malgré une dispersion inévitable, les points de mesures se répartissent plutôt bien au voisinage de la droite théorique attendue. Ce bon accord résulte en partie du fait que chaque valeur de D sur le diagramme est la moyenne de 5 mesures.

Nous avons d'autre part comparé des résultats obtenus à Satolas le 31.07.1980 avec les courbes de BLACKWELL transcrites à une bonne approximation dans le système d'axes ($\sqrt{C_R} \text{ R.C.S.R. } (L_R), D$). Voir figure 13.

La droite en pointillé représente une régression linéaire sur tous les points du diagramme.

Il n'y a pas de raison d'obtenir un accord étroit car les conditions d'observation et de dépouillement sont différentes.

On remarque que la loi de BLACKWELL-RICCO donne cependant plutôt une limite haute de la distance de visibilité (tout en représentant correctement l'allure générale du phénomène). Les résultats obtenus seront donc des minorants.

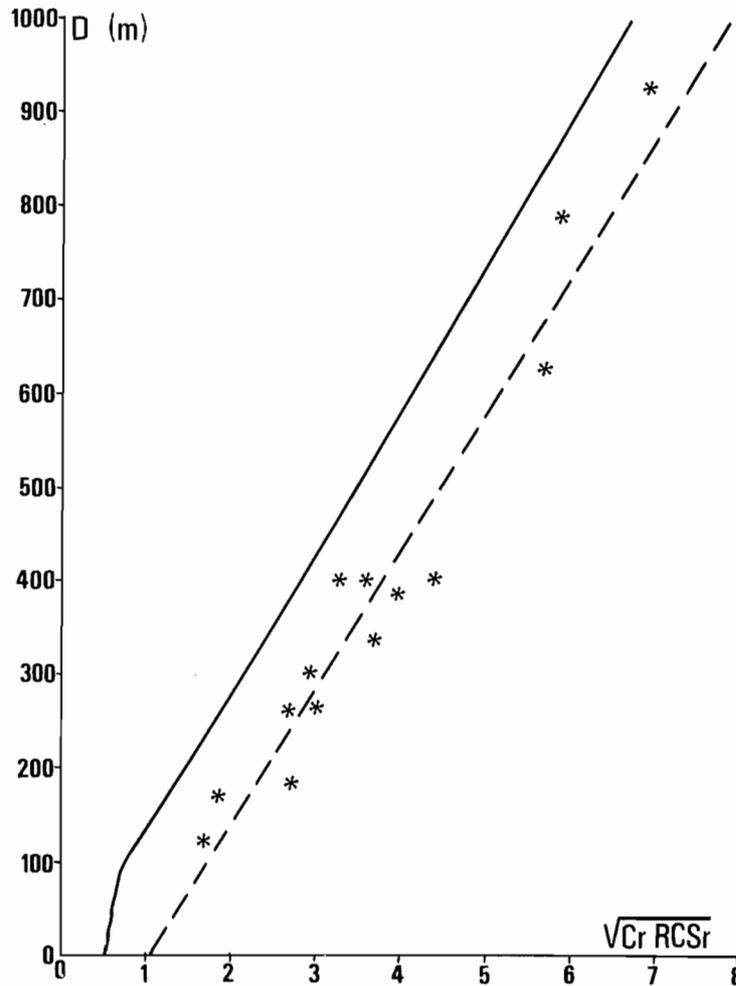


Fig. 13. – Vérification expérimentale de la formule fondamentale. **Courbe pleine** : courbe de Blackwell. **Courbe pointillée** : régression linéaire sur tous les points expérimentaux (Essais effectués le 31.07.1980).

b) Les essais sur un tunnel réel

Nos prospections nous ont fait choisir le tunnel du Pas du Mortier, sur la route d'Autrans à Montaud (Isère).

C'est un tunnel très peu circulé et non éclairé. L'alignement droit à la tête côté Autrans est de l'ordre de 170 m ce qui est un peu court (fig. 14).

Nous avons appliqué la même méthode de mesures qu'à Satolas.

La grande différence réside dans la topographie du site. On n'a plus un environnement spatial plat et uniforme. La tête du tunnel est encaissée dans la roche et une zone d'ombre (ou deux suivant l'heure) précède l'entrée dans le trou noir. A Satolas, les relevés continus nous donnaient un voile de FRY constant. Au Pas du Mortier le voile de FRY chute brusquement à l'entrée en zone d'ombre. La figure 15 montre les résultats alors obtenus.

On voit que dès l'entrée dans les zones d'ombre précédant le tunnel, les points relevés :

$$D = f(\sqrt{C_R R.C.S.R. (L_R)})$$

ne suivent plus du tout une loi linéaire au moment exact où le conducteur pénètre dans l'ombre. A première vue, on pourrait penser à un défaut d'adaptation temporelle.

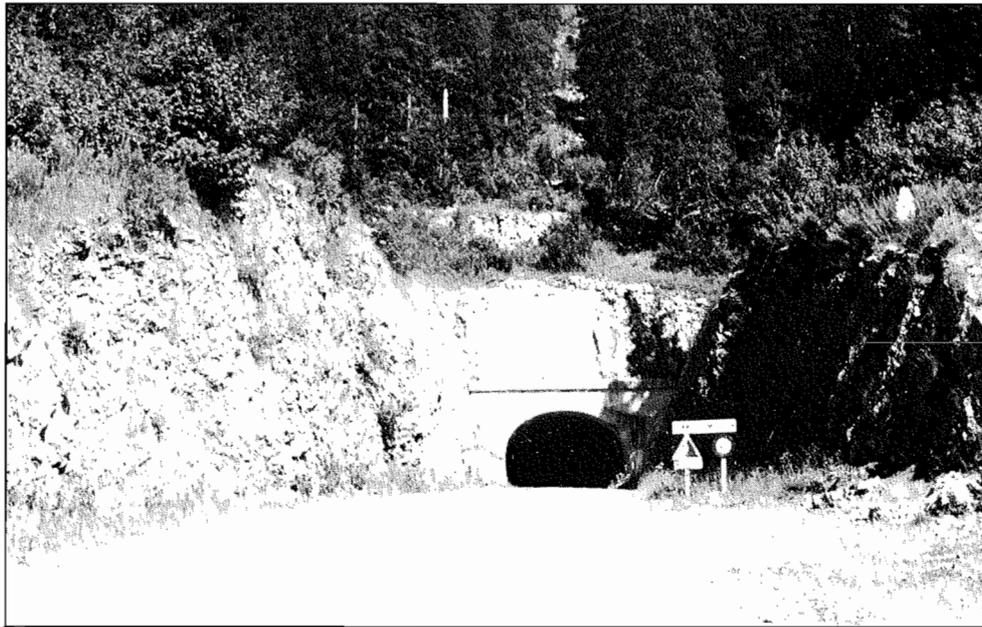


Fig. 14. – Tunnel du Pas du Mortier côté Autrans.

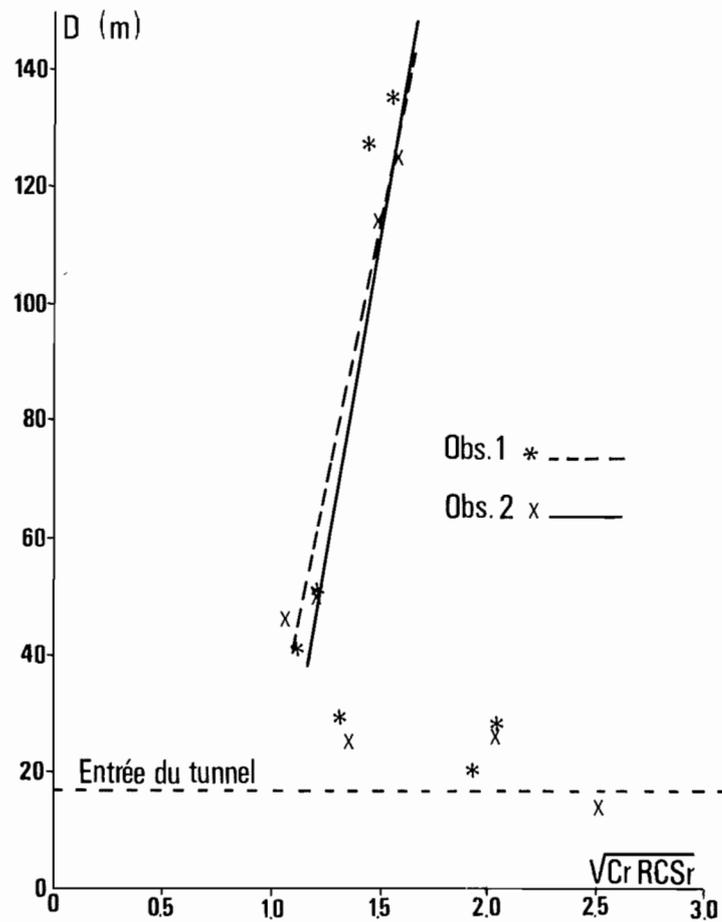


Fig. 15. – Résultats du Pas du Mortier du 16.09.1980 de 13 h 40 à 15 heures. Les points où le véhicule est très proche de l'entrée du tunnel ont été volontairement écartés pour le calcul de régression linéaire.

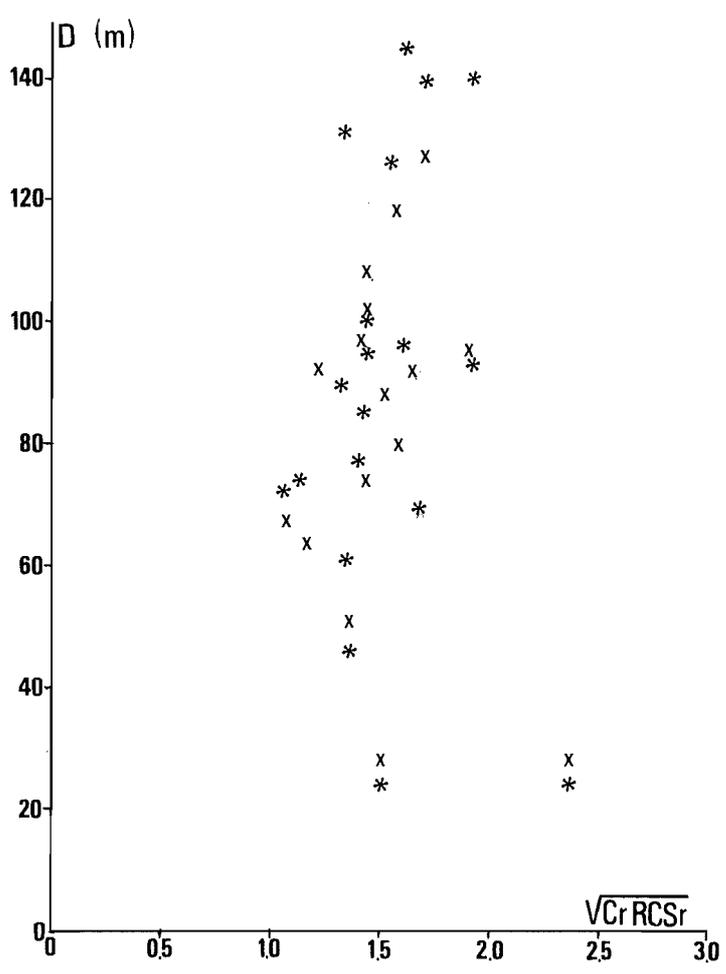


Fig. 16. – Résultats du Pas du Mortier du 24.09.1980 de 10 h 35 à midi.

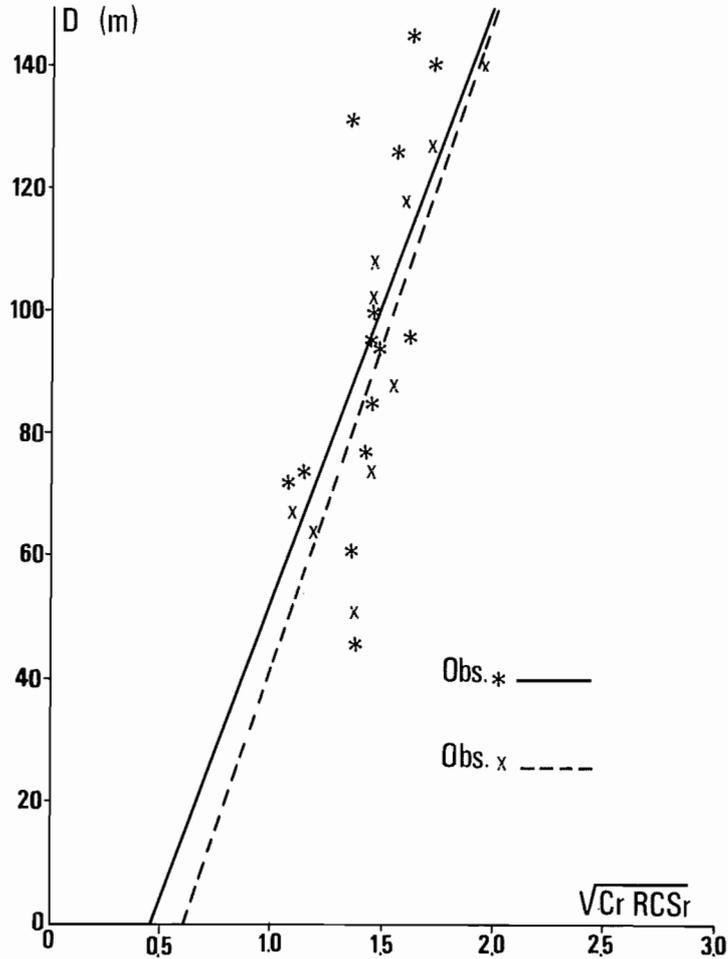


Fig. 17. – Résultats du Pas du Mortier du 24.09.1980 de 10 h 35 à midi.
Les points critiques ont été ôtés.

Cependant notre interprétation du phénomène est différente.

Nous nous trouvons dans une zone de très forte variation de l'éclairement horizontal, de la luminance de FRY, de L_{PB} et donc de C_R . Pour éliminer ces rapides variations, il faudrait traverser cette zone à une vitesse très lente. Or, nous faisons tout le parcours à vitesse constante (environ 40 km/h) pour se placer toujours dans les mêmes conditions d'expérience. A cette vitesse, l'on parcourt environ 10 m/s., le temps de perception-réaction étant supérieur à 1 seconde, le top est enregistré lorsque des variations très sensibles des paramètres se sont produites. En 10 mètres, à partir de la zone d'ombre L_F passe de 29 à 2 cd/m² et L_{PB} de 29 à 9 cd/m².

On ne peut donc faire de mesure fiable dans cette zone. Or de nombreux points apparaissent juste à cet endroit car la forte variation de C_R qui se produit, augmente rapidement et considérablement la visibilité.

Une autre série de résultats nous montre ce que devient : $D = f(\sqrt{C_R R.C.S.R. (L_R)})$ lorsqu'on supprime les points au voisinage des discontinuités. Figures 16, 17.

Une précision est à apporter sur la zone de discontinuité. Elle apparaît sur une bande de 30 m environ sur la figure mais la limite réelle est bien une ligne nette séparant l'ombre de la zone ensoleillée, ligne qui a très peu varié en raison de la rapidité des mesures effectuées. La raison de ce phénomène est que nous avons fait varier la position du panneau à l'intérieur de la tête du tunnel. L'origine des mesures de D était donc mobile.

Lorsqu'on la fixe, ce sont l'entrée du tunnel et la limite de l'ombre qui deviennent mobiles. On remarque dans la figure 17 (points supprimés) que l'alignement des points subsistant est très correct et surtout, que les points pour lesquels D est comprise entre 0 et la zone de discontinuité sont sur cet alignement.

Autrement dit, une fois supprimés les points aberrants, les points relatifs à des tests vus par l'observateur situé en pleine lumière bien à l'extérieur du tunnel, semblent se trouver sur la même droite théorique que ceux vus par le conducteur après qu'il ait pénétré dans la zone d'ombre. Nous pensons donc que, au moins dans ce cas précis, le défaut d'adaptation temporelle joue un rôle négligeable.

1.3.3. **Conclusion**

A la précision des mesures près, les lois de RICCO et de la R.C.S. bien vérifiées au laboratoire, semblent pouvoir être utilisées in situ ce qui a priori n'était pas évident en raison des différences suivantes :

Laboratoire

L_f est constante dans tout le champ de vision.

Par définition des lois de RICCO et RCS, on ne tient pas compte des défauts d'adaptation temporelle.

In situ

L_f n'est à peu près constante que dans une petite région autour de l'objet. La prise en compte du champ périphérique ne s'effectue que par le voile de FRY.

1.4. **EXPLOITATION METHODOLOGIQUE**

1.4.1. **Exploitation ne prenant pas en compte le défaut d'adaptation temporelle**

1.4.1.1. *Notion de L_{ref} (V_{ref} , éclairage) et application de la formule fondamentale*

La relation fondamentale écrite et explicitée au § 1.2. permet d'établir une équivalence de visibilité entre des conditions différentes, aux approximations déjà mentionnées.

Afin de déterminer les niveaux de luminance nécessaires en tout lieu du tunnel, il faut définir une situation de référence servant de base au calcul. On peut ainsi évaluer la luminance donnant une visibilité équivalente à celle permise par cette situation.

Cette approche est sensiblement différente de celles habituellement conduites dans les études sur l'éclairage des tunnels. En effet, on définit généralement un obstacle type à voir depuis une certaine distance. Cet objet a une taille et un contraste intrinsèque donnés et une simulation en laboratoire permet d'évaluer la luminance de chaussée nécessaire pour voir l'obstacle en fonction des conditions d'ambiance simulées. Nous reviendrons sur la description de ces méthodes dans le § 1.6. concernant la comparaison de notre méthodologie avec les errements en vigueur.

a) Définition d'une situation de référence

On imagine un tunnel très long, en section courante, de sorte que les conducteurs soient parfaitement adaptés temporellement.

On suppose que, pour ce tunnel (en particulier pour le type d'éclairage donné), en l'absence de voiles atmosphérique et de pare-brise, une luminance de chaussée L_{ref} est suffisante pour la tâche visuelle du conducteur de référence circulant à la vitesse de référence V_{ref} , donc observant la chaussée à la distance de référence D_{ref} .

La situation de référence est déterminée par la tâche visuelle conditionnant L_{ref} en fonction :

- du système d'éclairage utilisé ;
- de la vitesse de l'utilisateur de référence.

b) Situation effective

Le même conducteur roule à la vitesse effective V_{eff} en présence de luminances de voiles parasites, **par exemple** en approchant l'entrée du tunnel.

On calcule, dans ces conditions, quelle doit être la luminance effective L_{eff} de la chaussée en appliquant la relation fondamentale :

$$\frac{\text{R.C.S.} [(L_{\text{eff}} T_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}}]}{\text{R.C.S.} [L_{\text{ref}}]} = \left(\frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{ref}}} \right)^2 \frac{(L_{\text{eff}} T_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}} + L_{\text{F}}}{L_{\text{eff}} T_{\text{atm}} T_{\text{PB}}}$$

c) Particularités et avantages

– Le caractère relatif de la R.C.S. permet de comparer des systèmes d'éclairage identiques, à la puissance près : pour que l'équation fondamentale soit vérifiée, il faut que l'éclairage effectif produise la même répartition lumineuse que l'éclairage de référence, le seul paramètre variable étant l'intensité.

Le passage d'un système d'éclairage à un autre sera discuté dans le § 1.5. "systèmes à mobilisation de contraste".

– Toute référence à un objet particulier a disparu : l'ensemble des objets au seuil de visibilité dans la situation de référence **reste** au seuil de visibilité dans la situation effective.

Cet aspect est très important car les Maîtres d'ouvrages peuvent juger peu réaliste un critère basé sur un objet particulier.

– Il est plus facile, par cette approche, d'expliquer aux responsables non spécialistes que l'éclairage de renforcement, bien que d'un coût élevé, ne fait au mieux que rétablir les seuils de visibilité médiocres existant dans la situation de référence.

– On peut comparer l'étude de l'éclairage d'un tunnel aux études d'éclairage public. Celles-ci préconisent en effet des luminances de chaussées de l'ordre de grandeur des L_{ref} (V_{ref}) que nous utilisons.

– Les principaux intervenants étant intégrés dans l'équation, il est facile d'isoler l'influence de tel ou tel de ces paramètres indépendamment des autres sans avoir à passer par des simulations différentes. Ceci est intéressant en particulier pour l'étude quantitative des variations de vitesse effective des usagers.

1.4.1.2. Application à la section courante

C'est le cas le plus simple de l'éclairage des tunnels. En effet, il n'existe pas de défaut d'adaptation spatiale. Par contre, l'équation fondamentale permet de prendre en compte l'opacité et la vitesse effective des usagers.

a) Calcul des luminances de voile

Si L est la luminance recherchée, les luminances de voile L_{atm} , L_{PB} , L_{F} sont fonctions de L et de l'opacité dans le tunnel.

– Voile atmosphérique

Une utilisation de la loi de KOSCHMIEDER effectuée au C.E.Tu. en 1975 et 1976 (8) donne l'expression de la luminance de voile atmosphérique en fonction du coefficient d'extinction K , de la luminance L , du facteur de réflexion ρ de la chaussée et de la caractéristique de diffusion Ω des particules dans la direction d'observation.

La luminance de voile créée par une couche d'air d'épaisseur d sous un éclairage E peut être approchée par :

$$L_{\text{atm}} = \frac{E}{\Omega} (1 - e^{-Kd})$$

$$\text{en écrivant } E = \frac{nL}{\rho}$$

on a :

$$L_{\text{atm}} = \frac{nL}{\rho\Omega} (1 - e^{-Kd})$$

Les mesures effectuées dans le tunnel du Mont Blanc (8) ont donné la valeur $\Omega = 20 \text{ lux m}^2/\text{cd}$, qui ne doit pas varier beaucoup en fonction des fumées émises. Nous fixons donc $\Omega = 20$ dans tous les calculs.

Le coefficient d'extinction K peut varier en théorie dans de larges proportions. En pratique, une atmosphère de tunnel présente des K variant entre 10^{-3} m^{-1} et $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ (à prendre comme un maximum à ne pas atteindre), les valeurs les plus courantes étant situées entre 5 et $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

En simplifiant de manière très grossière le problème de la réflexion des rayons lumineux arrivant sur la chaussée, on approxime cette dernière à une surface orthotrope, c'est-à-dire suivant la loi de Lambert. Ce n'est évidemment jamais le cas, mais cette hypothèse a le mérite de permettre une comparaison très aisée entre les différents revêtements possibles : en écrivant la loi de Lambert sous la forme

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

le facteur de réflexion ρ de la chaussée peut varier de $0,10$ (pour les chaussées très noires) à $0,24$ (pour des chaussées très claires). On voit que la connaissance de la chaussée est nécessaire avant les calculs d'éclairage car l'obtention d'une même luminance nécessite un éclairage pouvant aller du simple au double suivant le cas.

Le fait de procéder à une résolution du problème sur calculateur permet d'effectuer différents passages du programme de calcul en faisant varier les paramètres inconnus au moment du projet.

Plusieurs solutions provisoires peuvent être retenues jusqu'à une bonne connaissance de toutes les données nécessaires. On peut aussi évaluer une solution moyenne ainsi que son écart par rapport aux cas extrêmes.

– Voile de pare-brise.

De même que pour le voile atmosphérique, on ne peut donner une valeur exacte et absolue du voile de pare-brise en raison des différents verres spéciaux employés (teintés ou non, usures, rayures, épaisseurs différentes et surtout propreté ou buée). On doit cependant indiquer un ordre de grandeur de manière à tenir compte dans le programme de calcul, de la luminance de voile L_{PB} et du facteur de transmission T_{PB} .

- Transmission du pare-brise

Des mesures effectuées sur différents véhicules à vitres non teintées donnent des valeurs comprises généralement entre $0,8$ et $0,9$. L'état de salissure a une influence assez importante et difficile à quantifier. Nous avons estimé "raisonnable" une valeur de T_{PB} égale à $0,85$. Pour les vitres teintées le facteur de transmission est de l'ordre de $0,65$.

- Luminance de voile du pare-brise

Elle dépend de l'état de salissure et de l'éclairage arrivant sur le pare-brise. En effectuant des mesures en section courante de tunnels, pour un pare-brise propre, nous avons obtenu la valeur moyenne suivante :

$$L_{PB} \approx 0,03 L \text{ si } L \text{ est la luminance de chaussée.}$$

On voit que L_{PB} est très faible en section courante en raison du faible éclairage arrivant sur le pare-brise. On notera qu'il n'en est pas de même lorsque le véhicule est extérieur au tunnel à cause du fort éclairage naturel.

– Voile de FRY

Le voile de FRY peut être calculé en écrivant l'intégrale de FRY et en connaissant la répartition des luminances dans le champ visuel de l'utilisateur. Etant donné la difficulté de connaître, au stade du projet, l'exacte répartition des luminances dans le tunnel, on peut, en section courante, effectuer l'approximation suivante :

On suppose que le champ visuel de l'utilisateur présente une luminance uniforme L égale à celle de la chaussée. Cette approximation est sécurisante car les piédroits présentent une luminance souvent sensiblement inférieure à celle de la chaussée, et les appareils d'éclairage sont situés de manière à ne pas éblouir l'utilisateur.

On écrit donc : $L_F \approx 0,07 L$

b) Equation fondamentale appliquée au cas de la section courante

Nous possédons, en première approximation, tous les éléments permettant d'appliquer l'équation fondamentale au cas de la section courante des tunnels.

Si X est la luminance de chaussée recherchée :

$$\frac{\text{R.C.S.} [(XT_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}}]}{\text{R.C.S.} (L_{\text{ref}})} = \left(\frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{ref}}} \right)^2 \frac{(XT_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}} + L_F}{XT_{\text{atm}} T_{\text{PB}}}$$

équation dans laquelle on peut remplacer les luminances de voiles par leurs approximations :

$$L_{\text{atm}} \approx \frac{nX}{\rho\Omega} (1 - e^{-KD_{\text{eff}}})$$

$$L_{\text{PB}} \approx 0,03 X$$

$$L_F \approx 0,07 X$$

$$T_{\text{atm}} \approx e^{-KD_{\text{eff}}}$$

$$T_{\text{PB}} \approx 0,85$$

Afin de montrer l'importance de chaque paramètre, nous donnons quelques exemples dans les figures 18, 19 et 20.

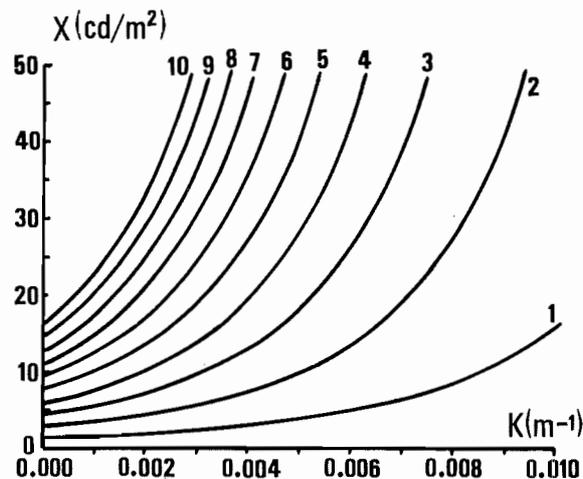


Fig. 18. – Niveau nécessaire X fonction de L_{ref} (qui varie de 1 à 10 cd/m^2) et du coefficient d'extinction des fumées K.

La figure 18 donne X en fonction de l'opacité et du niveau de référence L_{ref} pour $D_{\text{ref}} = D_{\text{eff}} = 105 \text{ m}$, ce qui correspond d'après les normes ICTARN (9) à une vitesse de 80 km/h. On obtient des valeurs qui paraissent pharamineuses mais il faut toujours avoir à l'esprit que l'on fixe un niveau de visibilité arbitraire avec L_{ref} et que l'on obtient X à partir de ce niveau. Par exemple pour un coefficient d'extinction de 10^{-2} m^{-1} et $L_{\text{ref}} = 1 \text{ cd/m}^2$ on voit que X doit être supérieur à 15 cd/m^2 pour conserver une vitesse de 80 km/h.

Cependant, lorsque l'opacité est telle dans un tunnel, la vitesse des véhicules est généralement très faible, car il s'agit en principe d'un embouteillage. D'où l'importance du réseau des courbes donnant X en fonction de D_{ref} , D_{eff} et L_{ref} pour une opacité supposée nulle (figures 19 et 20) :

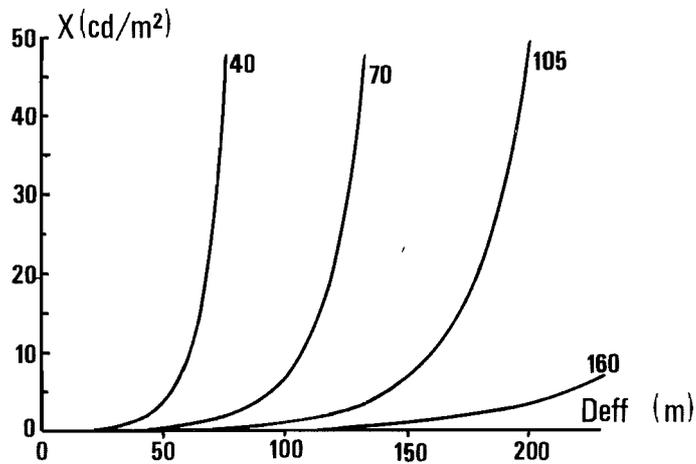


Fig. 19. - $X(D_{eff})$ pour $L_{ref} = 1 \text{ cd/m}^2$ et $D_{ref} = 40, 70, 105, 160 \text{ m}$

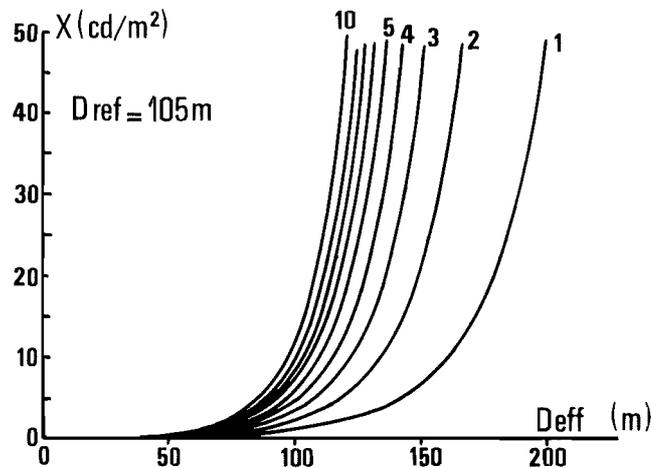


Fig. 20. - $X(D_{eff})$ pour $D_{ref} = 105 \text{ m}$ et $L_{ref} = 1 \text{ à } 10 \text{ cd/m}^2$.

Les courbes obtenues montrent combien l'influence de la vitesse de référence est importante. Ici l'opacité est nulle et donc n'intervient pas. Mais il va de soi que la présence de fumée redresserait encore plus les courbes.

En résumé, les valeurs obtenues paraissent crédibles, même si elles sont parfois très fortes. Il ne faut pas oublier en effet qu'aux niveaux requis en tunnel, une "récupération" de visibilité par une augmentation de luminance est forcément coûteuse, d'après l'allure de la R.C.S. Nous allons voir que cela est encore plus vrai pour le renforcement d'entrée.

c) Valeurs pratiques généralement retenues

L'équation fondamentale conduit à des valeurs de luminance de chaussée strictement nécessaires à la conservation d'un seuil de visibilité plus ou moins élevé suivant les hypothèses retenues en situation de référence.

Le calcul ne fait intervenir qu'indirectement la notion de confort, souvent recherchée dans le cas des ouvrages urbains par exemple.

Les ordres de grandeur pratiques ne conduisant pas à des problèmes majeurs de visibilité sont les suivants :

Tunnels de montagne	: 3 à 5 cd/m ²
Tunnels de rase campagne	: 5 à 10 cd/m ²
Tunnels urbains	: 10 à 20 cd/m ² .

L'adoption par le projeteur de niveaux plus faibles ne peut être faite qu'après des calculs précis en appliquant la méthode décrite dans le § 1.4, ce qui imposera, dans la plupart des cas, une stricte limitation de vitesse.

1.4.1.3. Application à l'ensemble du tunnel

a) Application sur [O, D_{eff}]

– Principe du calcul

L'équation fondamentale s'écrit exactement comme pour la section courante :

$$\frac{\text{R.C.S.} [(XT_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}}]}{\text{R.C.S.} (L_{\text{ref}})} = \left(\frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{ref}}} \right)^2 \frac{(XT_{\text{atm}} + L_{\text{atm}}) T_{\text{PB}} + L_{\text{PB}} + L_{\text{F}}}{XT_{\text{atm}} T_{\text{PB}}}$$

Cependant, le calcul est plus sophistiqué qu'en section courante :

– d'une part, les arguments X , T_{atm} , L_{atm} , L_{PB} , L_{F} , ne peuvent plus être approximés par des constantes car ils sont fonctions de l'abscisse du point d'attention (et donc de celle du conducteur).

– d'autre part, des itérations sont nécessaires : plus on éclaire, plus on augmente les voiles parasites... et plus il faut éclairer. En pratique, on effectue la démarche suivante :

● itération 0

Le tunnel n'est pas éclairé. Sur le site ont été mesurées les luminances de voiles dues à l'éclairage naturel. Des précisions sur ces mesures sont données dans le § 1.4.3. "Détails pratiques". Les mesures doivent être effectuées sur une distance au moins égale à D_{eff} depuis l'entrée du tunnel comme le montre le schéma de la figure 21.

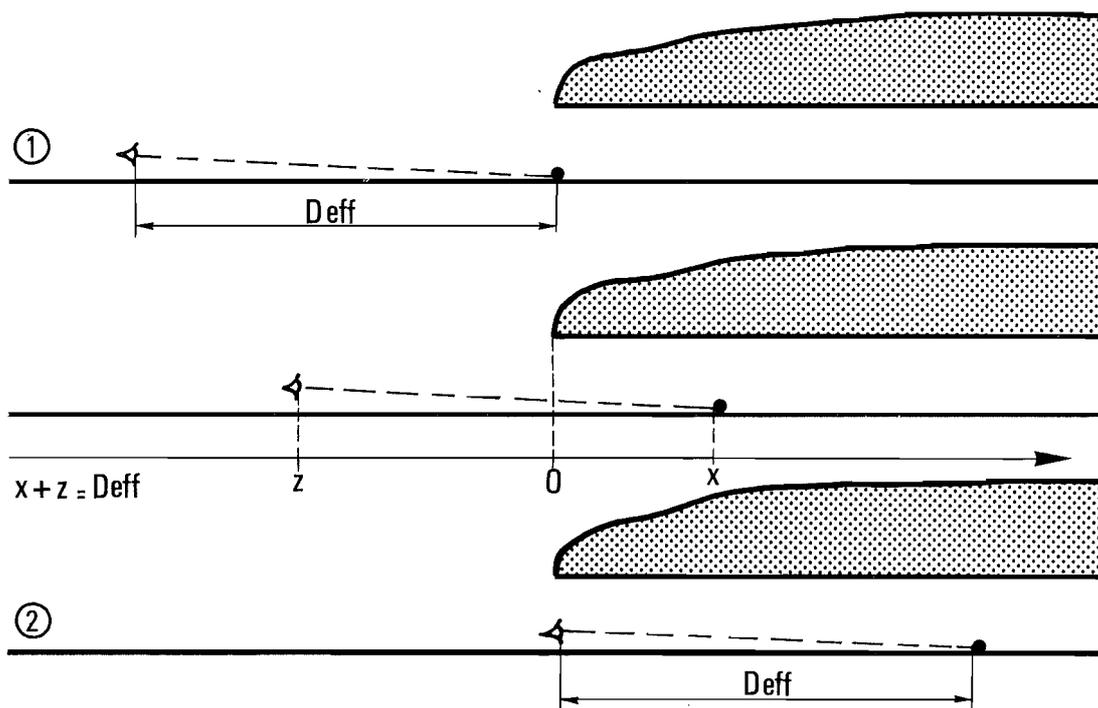


Fig. 21. – Situation ①, le point d'attention pénètre dans le tunnel.
Situation ②, l'usager entre dans le tunnel.

En situation ①, il est nécessaire de connaître la luminance rétinienne de l'utilisateur afin de définir l'éclairage nécessaire à l'entrée du tunnel. Sur tout le trajet entre ① et ②, on doit connaître la variation des luminances de voiles. En situation ②, l'utilisateur pénètre dans le tunnel et donc les luminances de voiles extérieurs s'annulent.

L'application de l'équation fondamentale permet de calculer la luminance $X_0(x)$ nécessaire sur $[0, D_{eff}]$ à l'intérieur du tunnel en fonction des luminances $L_{atm_0}(z)$, $L_{PB_0}(z)$ et $L_{F_0}(z)$ mesurées sur le site et qui constituent les données du problème.

● itération 1 :

On suppose le tunnel éclairé sur les D_{eff} premiers mètres par l'éclairage $X_0(x)$ calculé à l'itération précédente. Les luminances de voiles ont donc les valeurs $L_{atm_1}(z)$, $L_{PB_1}(z)$, $L_{F_1}(z)$ engendrées par le cumul de l'éclairage naturel et de l'éclairage artificiel donnant $X_0(x)$.

Ces nouvelles valeurs permettent de calculer $X_1(x)$ sur $[0, D_{eff}]$. On a évidemment $X_1(x) \geq X_0(x)$ et donc un supplément de luminances de voile, qui, une fois quantifié, permet de calculer $X_2(x)$ et ainsi de suite.

En fonction des valeurs des données du problème (luminances de voiles extérieurs, rapport $\frac{D_{eff}}{D_{ref}}$, luminance de référence L_{ref} , opacité en tunnel), les itérations peuvent converger ou diverger. Si elles divergent, cela veut dire que même un éclairage infini est impuissant à compenser la chute de visibilité provoquée par les voiles parasites ou par l'allongement demandé de la distance de visibilité en cas de vitesse excessive.

Nous montrerons par des exemples qu'en pratique la convergence est assez rapidement obtenue.

Nous avons retenu le critère de convergence suivant :

$$\text{sur } [0, D_{eff}] : \text{Max} | X_n(x) - X_{n+1}(x) | < 0,01 \text{ Max}(X_n(x))$$

– Quantification des paramètres

● On a mesuré les voiles extérieurs $L_{atm_0}(z)$, $L_{PB_0}(z)$, $L_{F_0}(z)$ supposés représentatifs pour le problème posé. Ces données sont disponibles sous forme de tableaux avec une valeur tous les mètres. Ce pas (qui peut sembler faible) permet d'avoir des courbes ne présentant pas de cassures trop nettes. D'autre part, il a été jugé nécessaire pour la précision des méthodes numériques d'intégration utilisées.

● La situation de référence est choisie. Pour un système d'éclairage classique (c'est-à-dire un système non asymétrique), nous montrerons au § 1.4.3.3. que l'on peut retenir la valeur : $L_{ref} = 1 \text{ cd/m}^2$ pour $D_{ref} = 105 \text{ m}$ équivalente à $V_{ref} = 80 \text{ km/h}$. Pour un système asymétrique, le calcul de L_{ref} est discuté au § 1.5. "Systèmes à mobilisation de contraste".

● On évalue le facteur de réflexion de la chaussée ρ .

Si ρ est inconnu au stade du projet, on peut prendre une valeur moyenne de 0,15 ou 0,18.

● On évalue aussi le coefficient d'extinction K dû aux fumées dans le tunnel. On est en principe maître de ce paramètre car les études d'éclairage sont effectuées au même moment voire après celles de ventilation et donc une valeur moyenne de K peut être obtenue.

Si on ne possède aucun élément de choix, on peut prendre $K = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ pour un tunnel long et $K = 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ pour un tunnel court bien ventilé naturellement. Ces estimations grossières doivent être affinées si des éléments d'évaluation sont disponibles.

● On fixe une vitesse effective de traversée de l'ouvrage donnant une distance d'arrêt D_{eff} .

Le tableau suivant donne une première approximation de la distance d'arrêt, en ligne droite, en fonction de la vitesse :

Vitesse (km/h)	40	60	80	100	120
Distance d'arrêt (m)	40	70	105	160	230

On a ainsi déterminé toutes les données nécessaires au calcul de l'itération 0.

– Calcul de l'itération 0

On résout, pour chaque valeur de x comprise entre 0 et D_{eff} , l'équation :

$$\frac{\text{R.C.S.} [(X_o(x) T_{\text{atm}} + L_{\text{atm}_o}(z)) 0,85 + L_{\text{PB}_o}]}{\text{R.C.S.} [L_{\text{ref}}]} = \left(\frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{ref}}} \right)^2 \frac{0,85 (X_o(x) T_{\text{atm}} + L_{\text{atm}_o}(z)) + L_{\text{PB}_o} + L_{\text{Fo}}}{0,85 T_{\text{atm}} X_o(x)}$$

le coefficient d'extinction K à l'extérieur du tunnel est peu élevé (souvent compris entre 10^{-4} et 10^{-5} m^{-1}). Sur les distances D_{eff} utilisées, on peut écrire $T_{\text{atm}} \approx 1$.

On obtient ainsi un tableau de $D_{\text{eff}} + 1$ valeurs de X_o (avec un pas de calcul de 1 mètre).

– Calcul des itérations suivantes :

La luminance $X_o(x)$ crée un supplément de voiles atmosphérique et de FRY.

● Supplément de voile atmosphérique

Le schéma de la figure 22 permet d'expliquer l'influence de l'éclairage du tunnel sur le voile atmosphérique.

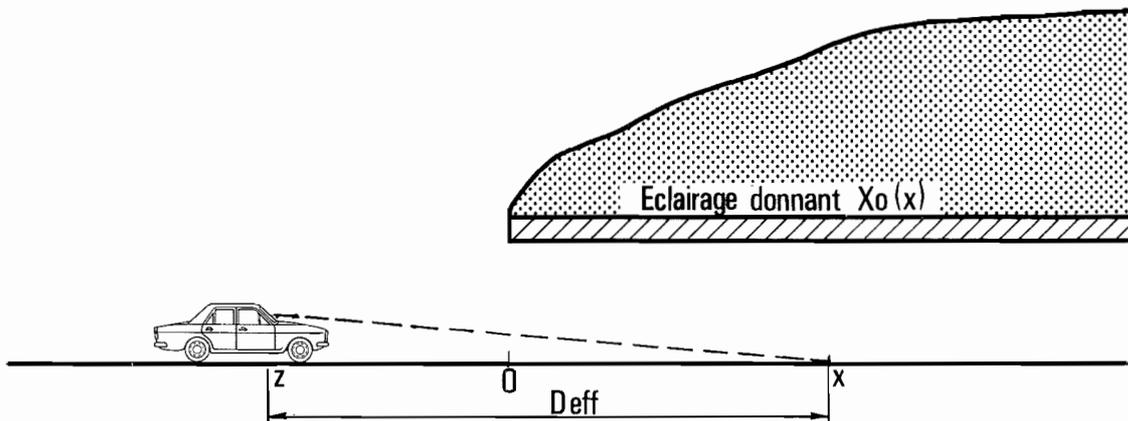


Fig. 22. – L'éclairage donnant $X_o(x)$ va engendrer un supplément de voile atmosphérique.

à l'itération 0, on a tenu compte seulement de $L_{\text{atm}_o}(z)$.

L'éclairage donnant $X_o(x)$ en présence d'un coefficient d'extinction K entraîne un supplément de luminance de voile atmosphérique. Vue depuis l'entrée du tunnel, la chaussée à l'abscisse x a la luminance apparente :

$$X_o'(x) = X_o(x) e^{-Kx} + \int_0^x e^{-Ky} \frac{KnX_o(y)}{\rho\Omega} dy$$

après la traversée de la couche d'air extérieure au tunnel, $X_o'(x)$ devient :

$$X_o''(x) = T_{\text{atm}} [X_o(x) e^{-Kx} + \int_0^x e^{-Ky} \frac{KnX_o(y)}{\rho\Omega} dy] + L_{\text{atm}_o}(z)$$

avec $T_{\text{atm}} \approx 1$

$X_o''(x)$ est la luminance apparente de la chaussée à la distance D_{eff} , en amont du pare-brise. Elle intègre la luminance intrinsèque et les luminances de voile atmosphérique sur le trajet des rayons lumineux dans la couche d'air séparant le véhicule du point d'attention.

Afin d'éviter un calcul numérique de l'intégrale $\int_0^x e^{-Ky} \frac{Kn}{\rho\Omega} X_o(y) dy$

qui représente un temps d'occupation de machine important (le calcul devant être fait pour x appartenant à $[0, D_{\text{eff}}]$, il est avantageux d'appliquer à $X_o(y)$, une régression polynomiale. Sur $[0, D_{\text{eff}}]$ en raison de l'allure générale de la variation et de la connaissance de $D_{\text{eff}} + 1$ valeurs de $X_o(y)$, une régression en polynôme de degré 2 donne entièrement satisfaction. L'intégrale ci-dessus est donc directement calculable ce qui entraîne un gain de temps très sensible pour les valeurs élevées de D_{eff} .

● Supplément de voile de FRY

Le fait d'éclairer l'intérieur du tunnel entraîne un supplément de l'éblouissement subi par l'utilisateur. Cependant cette augmentation de voile de FRY est minime par rapport à la forte valeur engendrée par l'éclairage extérieur.

Nous allons donc donner des moyens de calcul tout à fait grossiers mais dont la précision est amplement suffisante en regard des quantités intéressées.

– Approximations facilitant le calcul

Au § 1.2.3.2. nous avons rappelé que FRY était à l'origine de nombreux travaux sur l'éblouissement et en particulier avait élaboré une formule de calcul de la luminance de voile due à l'éblouissement pour une distribution $\mathcal{L}(\Theta, \varphi)$ quelconque.

Cette formule est la suivante :

le voile de FRY créé par une distribution de luminances $\mathcal{L}(\Theta, \varphi)$

$$L_F(\mathcal{L}(\Theta, \varphi)) = 3,96 \cdot 10^{-3} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Theta \mathcal{L}(\Theta, \varphi) \frac{\cos \Theta \sin \Theta}{\Theta \left(\Theta + \frac{1}{38,2} \right)}$$

Pour obtenir la valeur exacte de cette intégrale, il faut connaître précisément la distribution des luminances $\mathcal{L}(\Theta, \varphi)$. Le calcul devient vite compliqué si l'on ne procède pas à quelques approximations.

Tout d'abord, on considère le tunnel comme un cylindre, l'utilisateur regardant dans l'axe de ce cylindre comme l'indique le schéma de la figure 23.

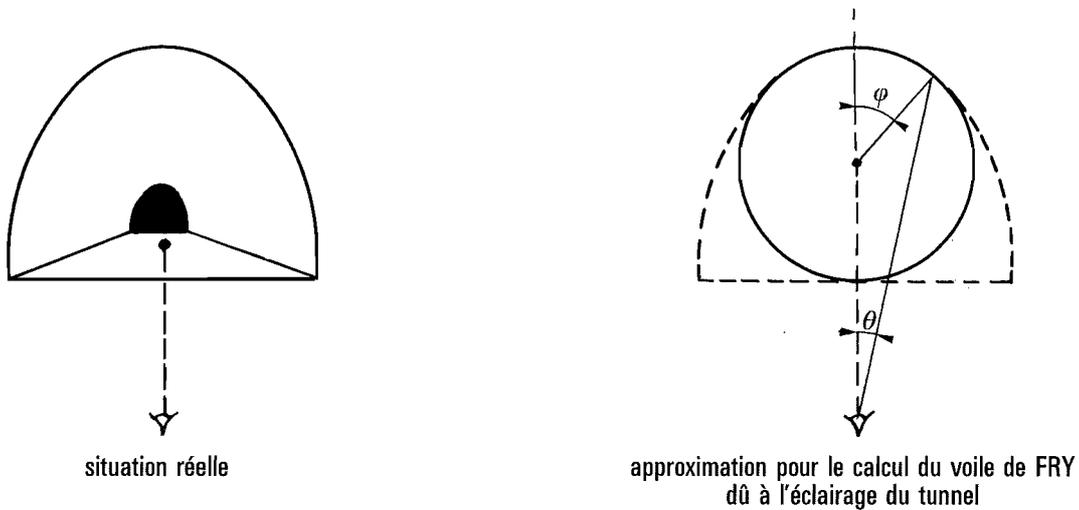


Fig. 23. – Simplification pour le calcul du supplément de voile de FRY.

Pour chaque position du conducteur ($x = 0$ à D_{eff}), on calcule le voile de FRY dû au tunnel de la manière suivante :

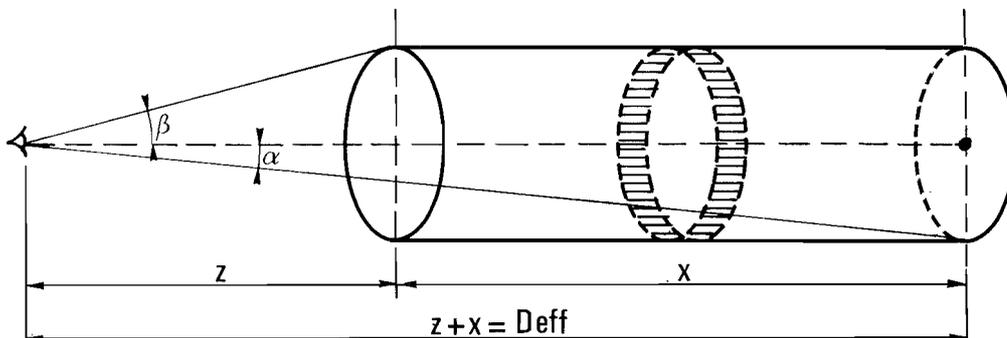


Fig. 24. – Prise en compte de la luminance par une découpe du cylindre en tranches élémentaires.

$$\alpha = \text{Arctg} \frac{R}{D_{\text{eff}}}; \quad \beta = \text{Arctg} \frac{R}{z}$$

On considère la luminance apparente $X'_0(x)$ de la chaussée à l'abscisse x , vue depuis l'entrée du tunnel et on effectue les approximations schématisées en figure 24.

– Chaque tranche de cylindre d'épaisseur 1 m a une luminance $X_0(y)$ pour y variant entre 0 et x .

– Le cylindre est fermé à l'abscisse x par un disque de luminance $X'_0(x)$.

Si R est le rayon du cylindre épousant le mieux la forme du tunnel, on scinde l'intégrale en deux :

$$3,96.2 \text{ n. } 10^{-3} \int_0^{\alpha} X'_0(x) \frac{\cos \Theta \sin \Theta}{\Theta \left(\Theta + \frac{1}{38,2} \right)} d\Theta$$

et

$$3,96.2 \text{ n. } 10^{-3} \int_{\alpha}^{\beta} X'_0(\Theta) \frac{\cos \Theta \sin \Theta}{\Theta \left(\Theta + \frac{1}{38,2} \right)} d\Theta$$

La distribution $X'_0(y)$ doit être transformée en $X'_0(\Theta)$.

Compte tenu des ordres de grandeur ($D_{\text{eff}} \gg R$), on peut utiliser un pas de calcul élevé en y .

Nous obtenons, en additionnant ces deux intégrales calculées pour chaque position du conducteur, le voile de FRY créé par l'éclairage du tunnel donnant l'itération X_0 . Celui-ci, rajouté à L_{F_0} , donne L_{F_1} , voile de FRY total rentrant dans les données du calcul de l'itération 1.

Le principe de calcul est évidemment le même pour les itérations suivantes.

b) Zone de transition et section courante

Rappelons que le défaut d'adaptation temporelle n'est pas étudié ici et que le § 1.4.2. lui est réservé.

Le calcul est supposé avoir convergé vers une valeur $X_n(x)$ pour x variant de 0 à D_{eff} . Ce tableau de valeurs va être utilisé pour le calcul de la luminance nécessaire tout au long du tunnel.

– Calcul de $X(D_{\text{eff}} + 1)$.

Le principe du calcul est le suivant : on connaît la distribution lumineuse sur tout le chemin œil-point d'attention et on cherche la luminance nécessaire au point d'attention.

Le premier point de calcul est donc à l'abscisse $D_{\text{eff}} + 1$. Les luminances de voiles parasites sont celles engendrées par l'éclairage artificiel en présence de l'atmosphère non limpide du tunnel. Les voiles de FRY et de pare-brise sont en principe faibles devant le voile atmosphérique.

Le calcul peut donc être conduit de la manière suivante :

- Voile de FRY :

En toute première approximation, si $X(D_{\text{eff}} + 1)$ est la luminance recherchée, on écrira $L_F = 0,07 X(D_{\text{eff}} + 1)$.

- Voile de pare-brise :

Il est dû à l'éclairage arrivant sur le pare-brise. De même qu'en section courante, on peut l'approximer grossièrement par 0,01 à 0,03 $X(1)$.

- Voile atmosphérique :

On a donné l'intégrale permettant de le calculer.

On prendra ici une méthode de calcul numérique car l'approximation de $X(x)$ par un polynôme peut, selon les cas, donner une erreur non négligeable.

- Calcul de $X(D_{\text{eff}} + 1)$

On dispose de tous les éléments permettant d'effectuer ce calcul par une méthode itérative.

– Calcul général.

De même que l'on a évalué $X(D_{\text{eff}} + 1)$, on va calculer $X(D_{\text{eff}} + 2)$ en faisant glisser le tableau des valeurs $X(x)$ d'un indice, c'est-à-dire en faisant avancer l'usager d'un mètre dans le tunnel. $X(D_{\text{eff}} + 1)$ devient donc $X(D_{\text{eff}})$, la valeur $X(0)$ est écrasée et remplacée par l'ancienne valeur $X(1)$. On calcule ainsi toutes les luminances, mètre par mètre, en faisant glisser le tableau des valeurs $X(x)$.

Pour les valeurs raisonnables de luminances de voiles extérieurs et de distances d'arrêt D_{eff} , les approximations faites conduisent à un calcul convergeant vers la valeur de X trouvée en section courante. Dans certains cas (heureusement peu fréquents), le calcul peut diverger pendant cette phase. Lorsque cela se produit, on a de toute façon atteint des valeurs de luminance de chaussée énormes sur $[0, D_{\text{eff}}]$ et il faut reconsidérer le projet depuis le départ (en général $\frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{ref}}}$ est trop grand).

1.4.1.4. Exemples de calcul de luminance de chaussée

Nous présentons quelques applications à des tunnels réels. Dans chaque cas, on a tracé les valeurs retenues pour L_{F_0} , L_{atm_0} , L_{PB_0} ainsi que les courbes de luminance nécessaire en tunnel en fonction de tous les paramètres.

Tous ces exemples correspondent à des tunnels réels, courts ou longs pour lesquels le même programme de calcul a été utilisé. Les problèmes de visibilité sont en effet les mêmes dans tous les cas, seules les valeurs des paramètres changent. Les distinctions rase campagne, autoroute, urbain, n'interviennent pas au niveau du calcul, la valeur $L_{\text{ref}} = 1 \text{ cd/m}^2$ ayant été retenue pour tous les ouvrages.

Dans les figures représentant la luminance de chaussée nécessaire, sur l'intervalle $[0, D_{\text{eff}}]$, la courbe en pointillés est le résultat de l'itération zéro. Les courbes suivantes, en trait plein correspondent aux itérations 1, 2... n, dont le nombre varie selon les données.

a) Tunnel court type autoroutier

Le tunnel étudié comporte deux tubes unidirectionnels à trois voies de circulation mesurant 104 m environ.

Le choix est fait d'appliquer la méthodologie de la même manière que pour un tunnel long.

Seule la tête nord est étudiée ici.

– Mesures et hypothèses.

- Du voile de FRY mesuré, nous avons tiré la courbe jugée représentative et jointe en figure 25.

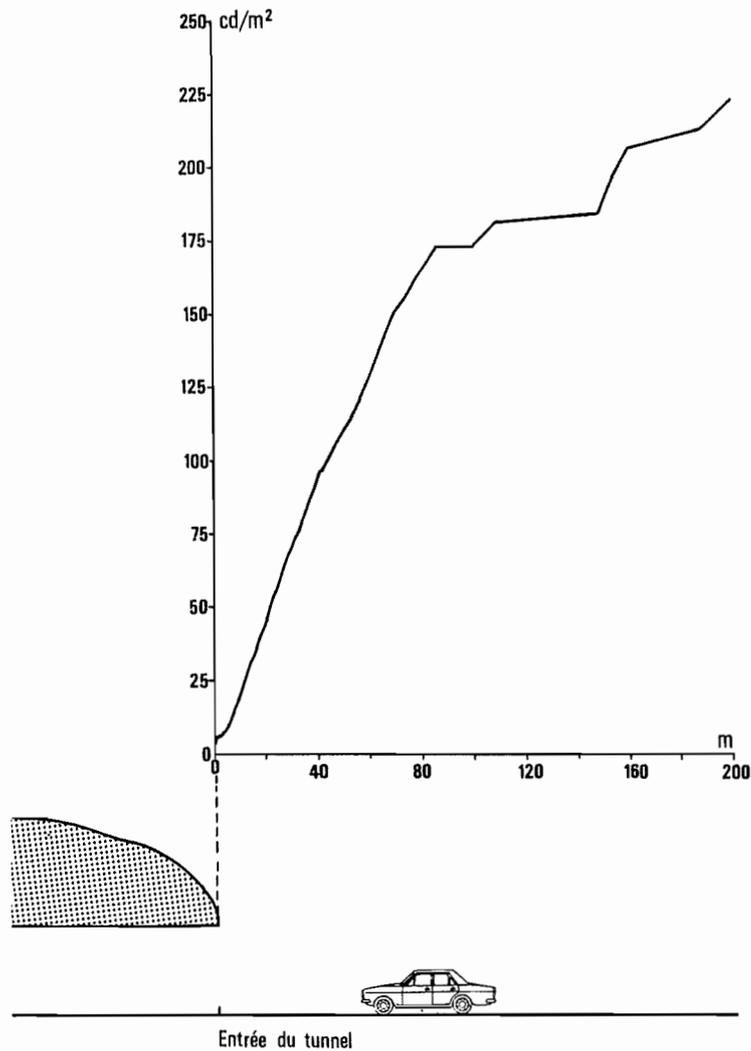


Fig. 25. – Voile de FRY.

● Pour ce tunnel, les essais ont été réalisés sous trafic, nous n'avons pu mesurer les voiles atmosphérique et de pare-brise mais différentes hypothèses ont été prises :

- 1 – $L_{atm}(x) = 1 \times x$ soit $L_{atm}(100\text{ m}) = 100\text{ cd/m}^2$
- 2 – $L_{atm}(x) = 2 \times x$ soit $L_{atm}(100\text{ m}) = 200\text{ cd/m}^2$
- 3 – $L_{atm}(x) = 3 \times x$ soit $L_{atm}(100\text{ m}) = 300\text{ cd/m}^2$

Pour chacun de ces cas, nous avons associé un voile de pare-brise L_{PB} évalué en fonction du site. Les valeurs retenues sont représentées dans les figures 26, 30 et 34.

Pour un couple de voiles L_{atm} , L_{PB} , nous avons tracé une famille de courbes de luminance nécessaire dans le tunnel équivalente à la luminance de référence $L_{ref}(80\text{ km/h}) = 1\text{ cd/m}^2$.

Le facteur de réflexion diffuse de la chaussée est estimé à 0,15.

Le coefficient maximal d'extinction K est estimé dans le tunnel à $5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^{-1}$.

Le tunnel est très dégagé et le pistonement des véhicules limite l'opacité à des valeurs faibles, $5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^{-1}$ doit donc être considéré comme un maximum. Trois vitesses effectives ont été choisies pour le calcul : 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h.

– Résultats

Les résultats sont classés par "familles" de voiles L_{atm} et L_{PB} . Les vitesses effectives sont inscrites sur les figures qui représentent la luminance nécessaire en fonction de l'abscisse dans le tunnel (le point 0 représentant l'entrée de l'ouvrage). On a tracé les itérations du calcul qui tient compte du supplément de voile atmosphérique apporté lorsqu'on éclaire, en présence d'opacité, le tunnel.

On peut donc facilement évaluer l'influence énorme de la vitesse effective d'approche.

Si l'on prend la première famille de courbes (fig. 27, 28, 29) 30 cd/m^2 suffisent à l'entrée du tunnel pour un usager arrivant à 60 km/h alors qu'il en faut 90 pour 80 km/h et 310 pour 100 km/h.

Autre phénomène remarquable :

Les itérations du calcul représentées sur chaque figure montrent que lorsque l'on est conduit à prévoir un fort éclairage en présence d'opacité, le supplément de voile atmosphérique entraîné est énorme, il en résulte une luminance de chaussée nécessaire qui va croissant dans le tunnel. Evidemment, le coefficient d'extinction K de $5 \cdot 10^{-3} m^{-1}$ est élevé pour un tunnel de 100 m et un calcul d'éclairage selon notre méthode devrait être fait dans ce cas avec une valeur moyenne bien plus faible. Nous avons effectué ces calculs avec une valeur d'opacité courante dans de nombreux tunnels. Si on diminue la valeur de K , le supplément de voile atmosphérique dû à l'éclairage sera évidemment moindre.

On s'aperçoit que l'effet de variation de L_{atm} est secondaire devant l'influence de la vitesse d'approche. Le cumul des deux phénomènes est cependant très pénalisant.

Si l'on veut concevoir un éclairage "classique" de jour pour un tunnel court, on retrouve les mêmes difficultés que pour un tunnel long. Une vitesse d'approche élevée se paie par un éclairage pharamineux.

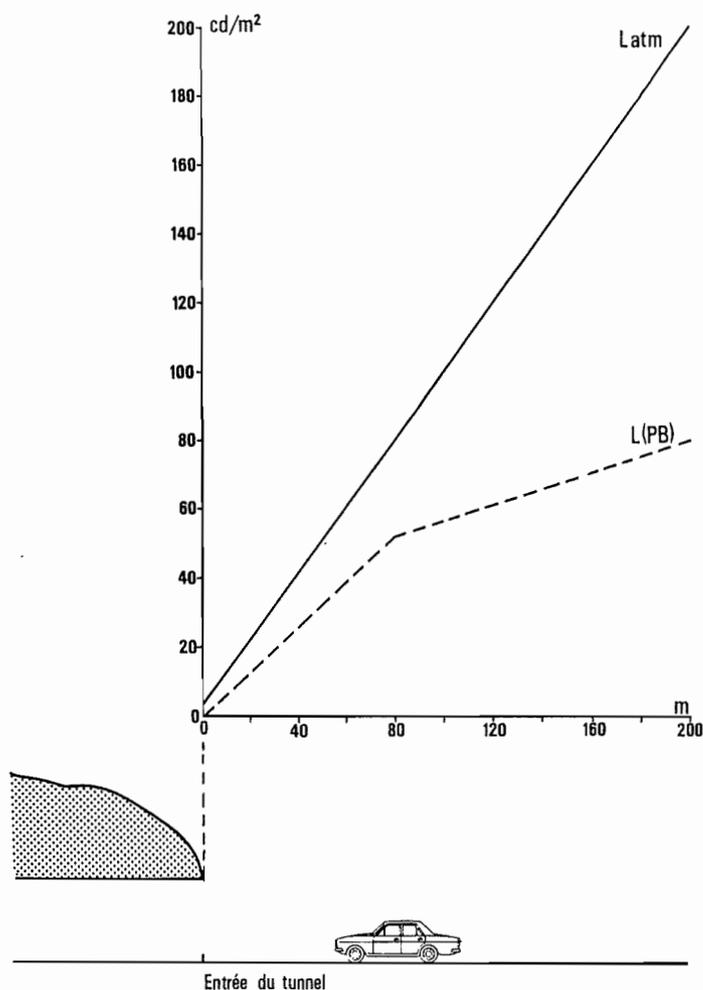


Fig. 26. – Voiles atmosphérique et de pare-brise.

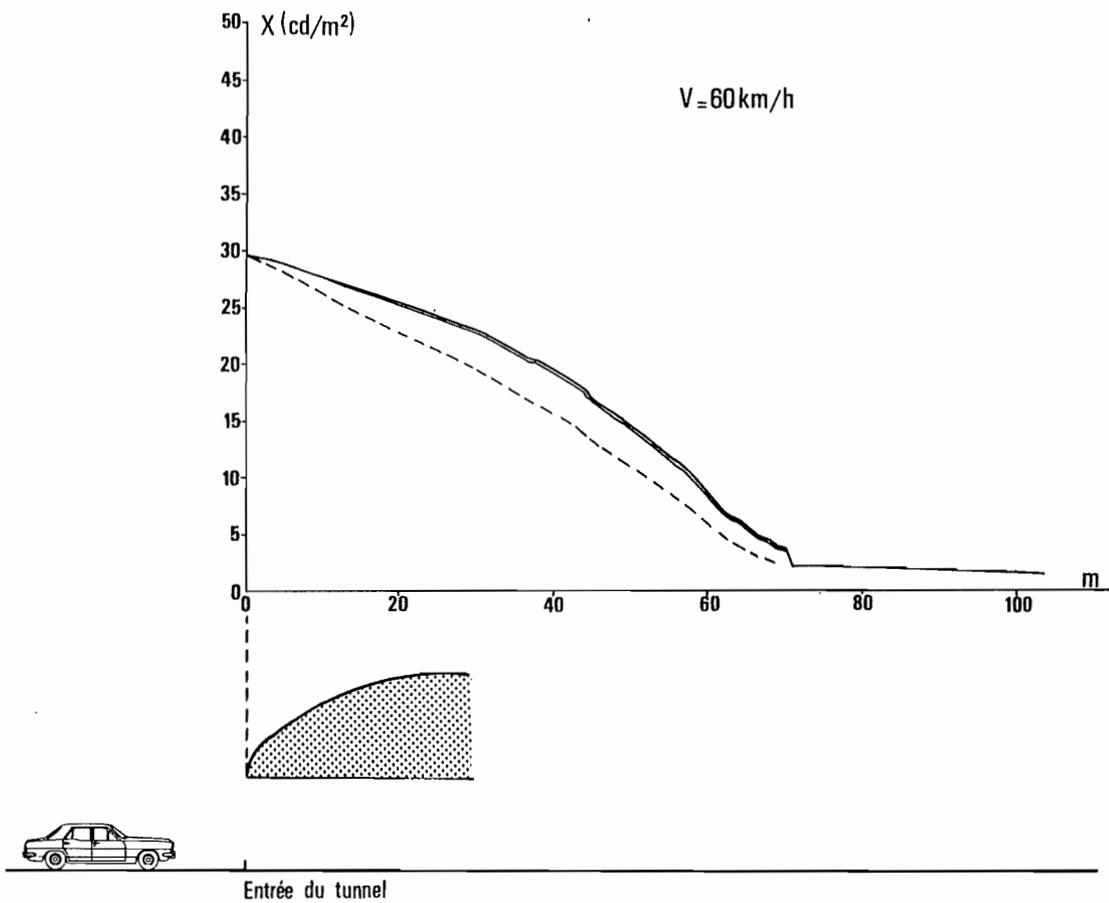


Fig. 27. – Luminance de chaussée.

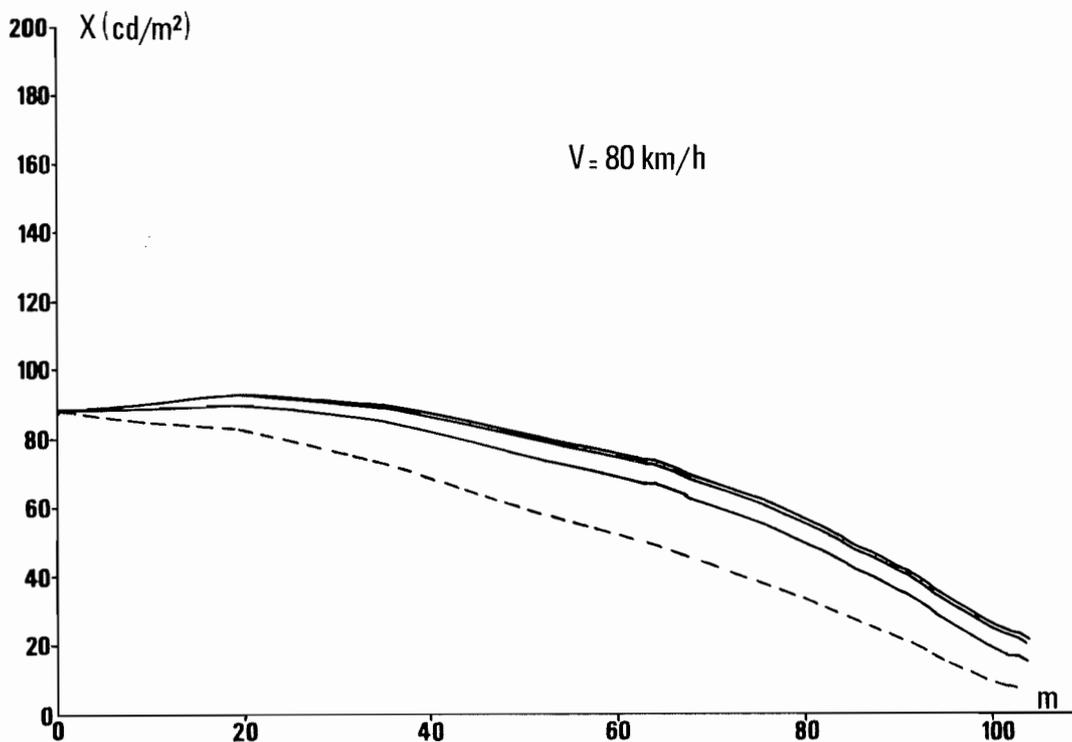


Fig. 28. – Luminance de chaussée.

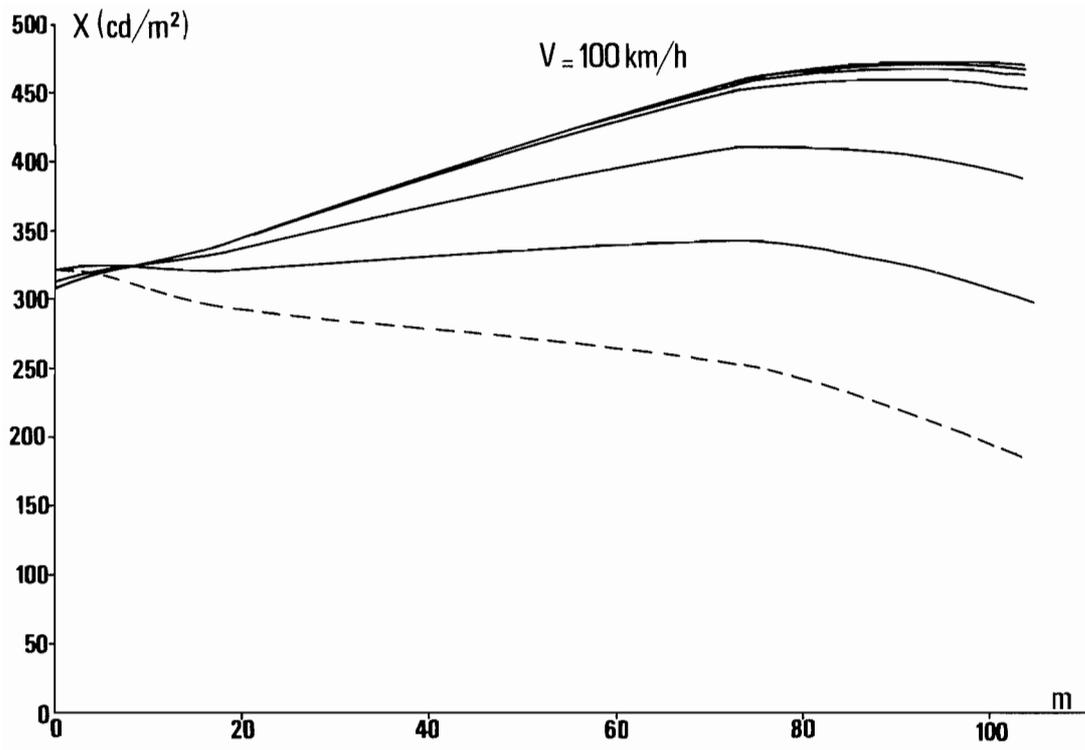


Fig. 29. – Luminance de chaussée.

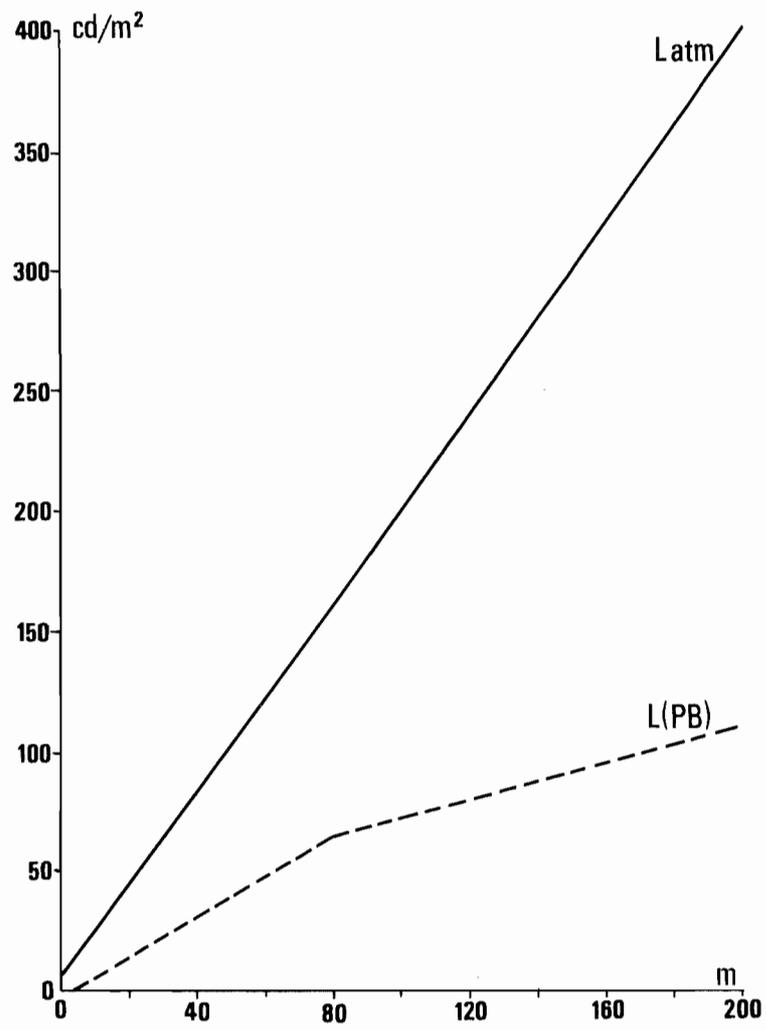


Fig. 30. – Voiles atmosphérique et de pare-brise.

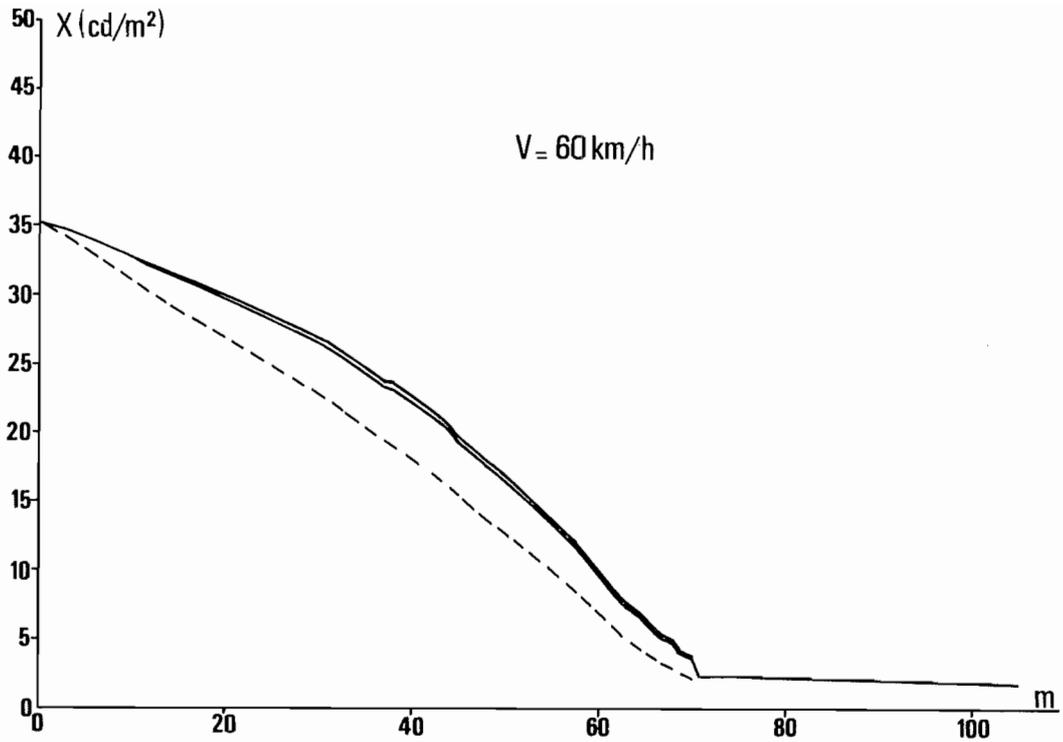


Fig. 31. – Luminance de chaussée.

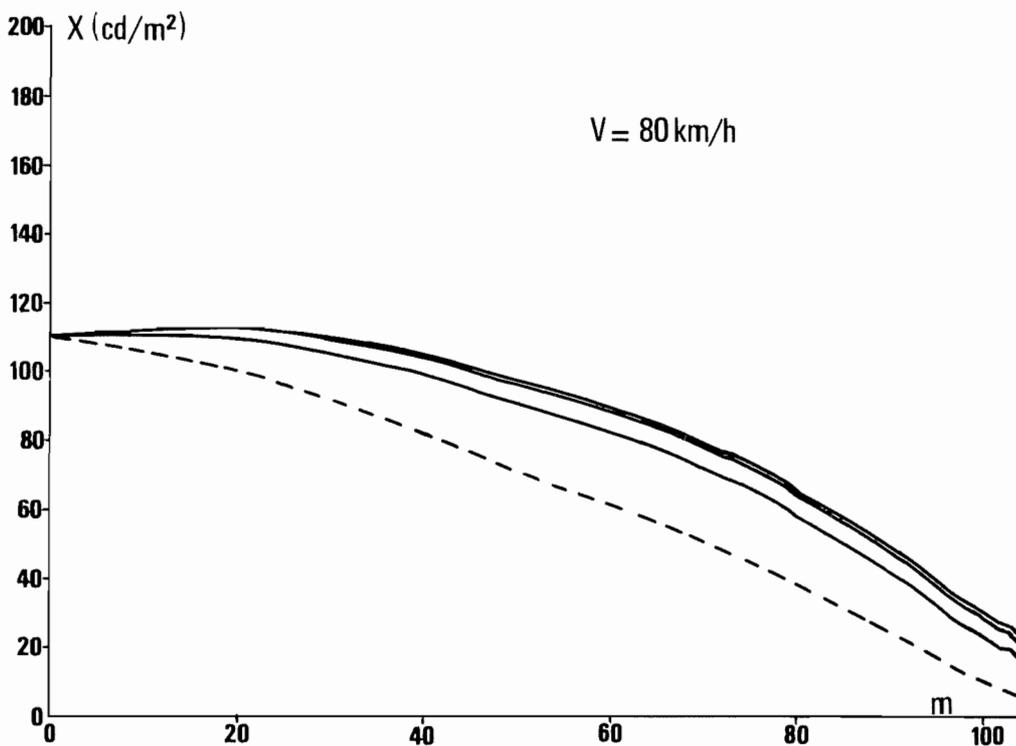


Fig. 32. – Luminance de chaussée.

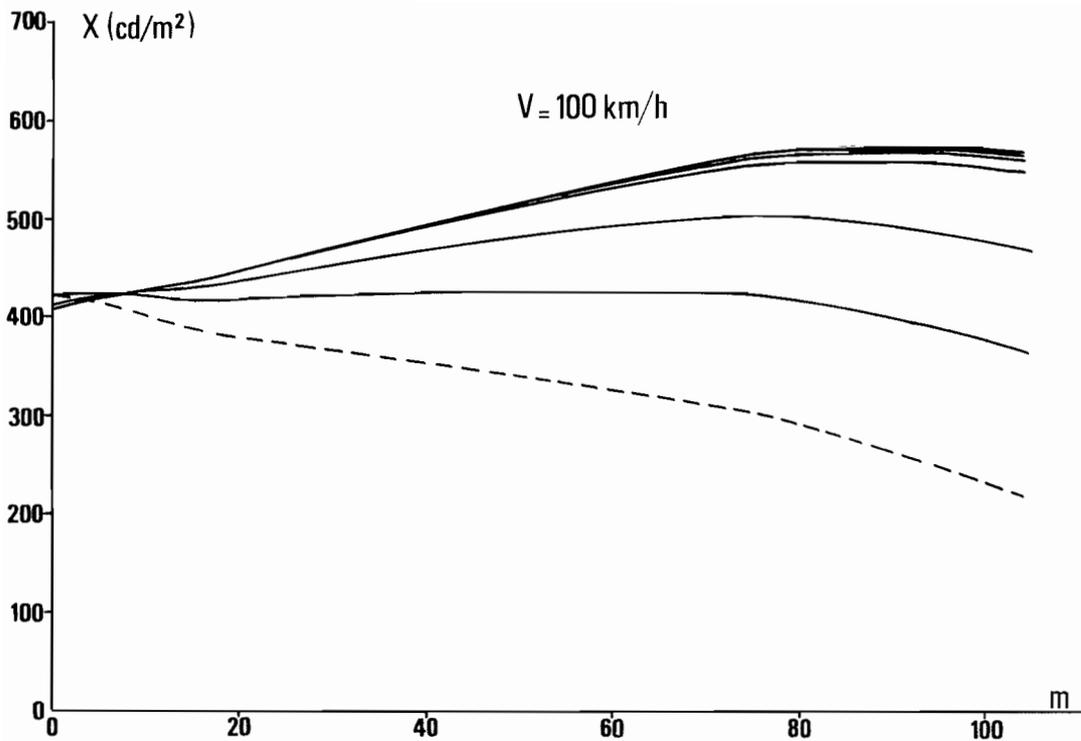


Fig. 33. – Luminance de chaussée.

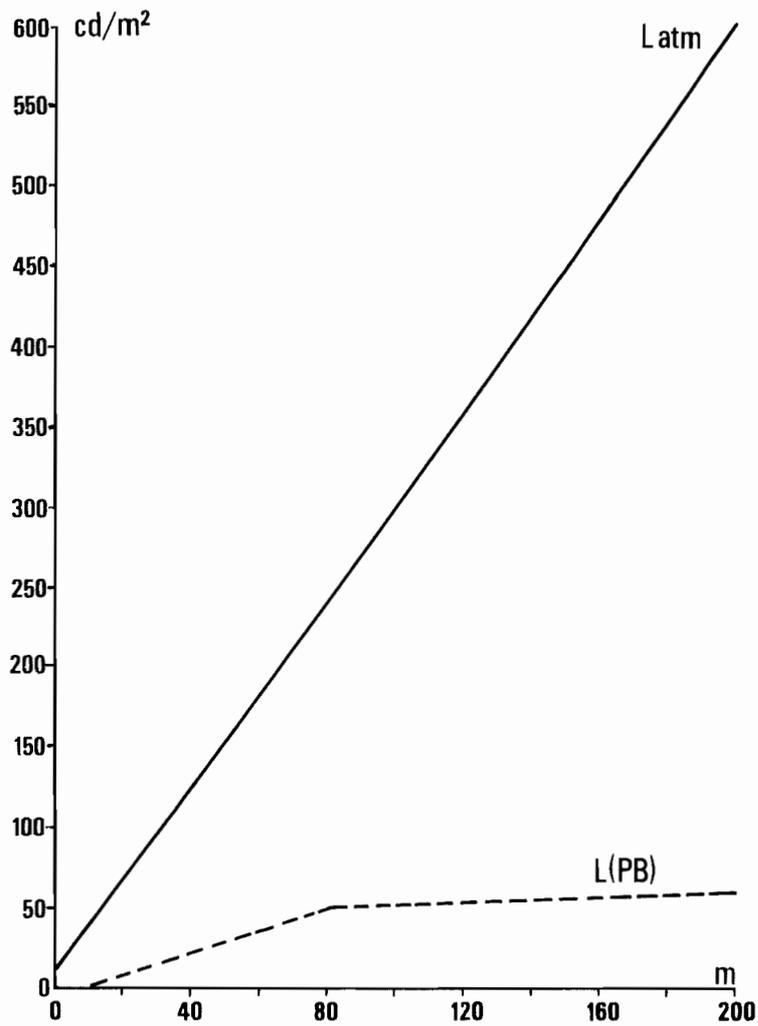


Fig. 34. – Voiles atmosphérique et de pare-brise.

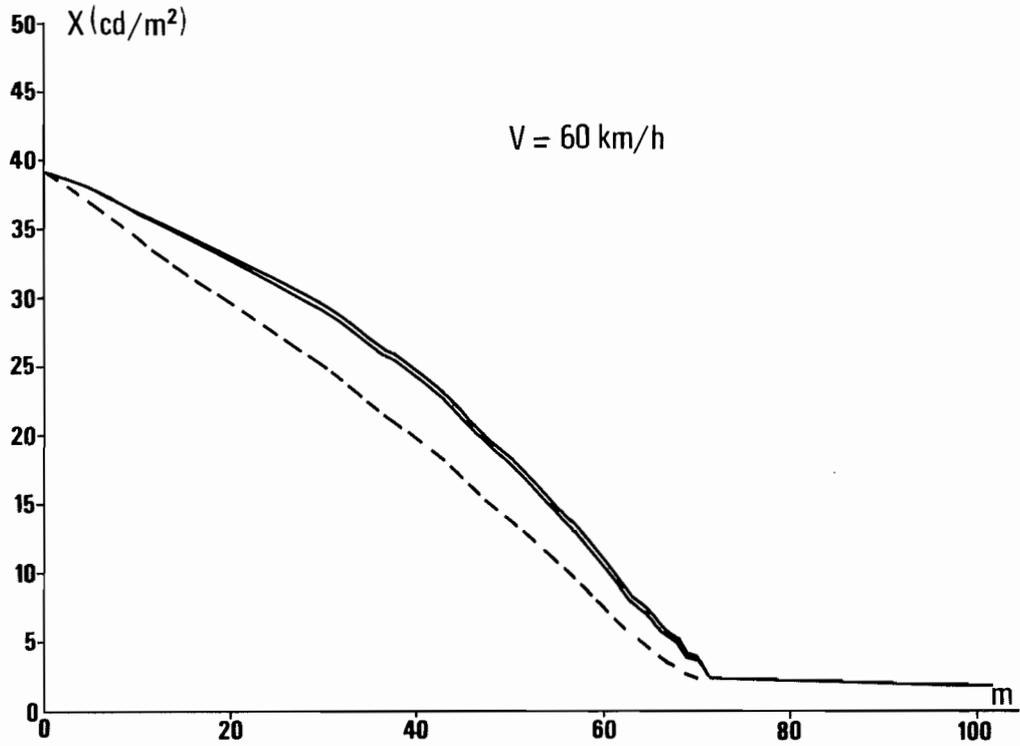


Fig. 35. – Luminance de chaussée.

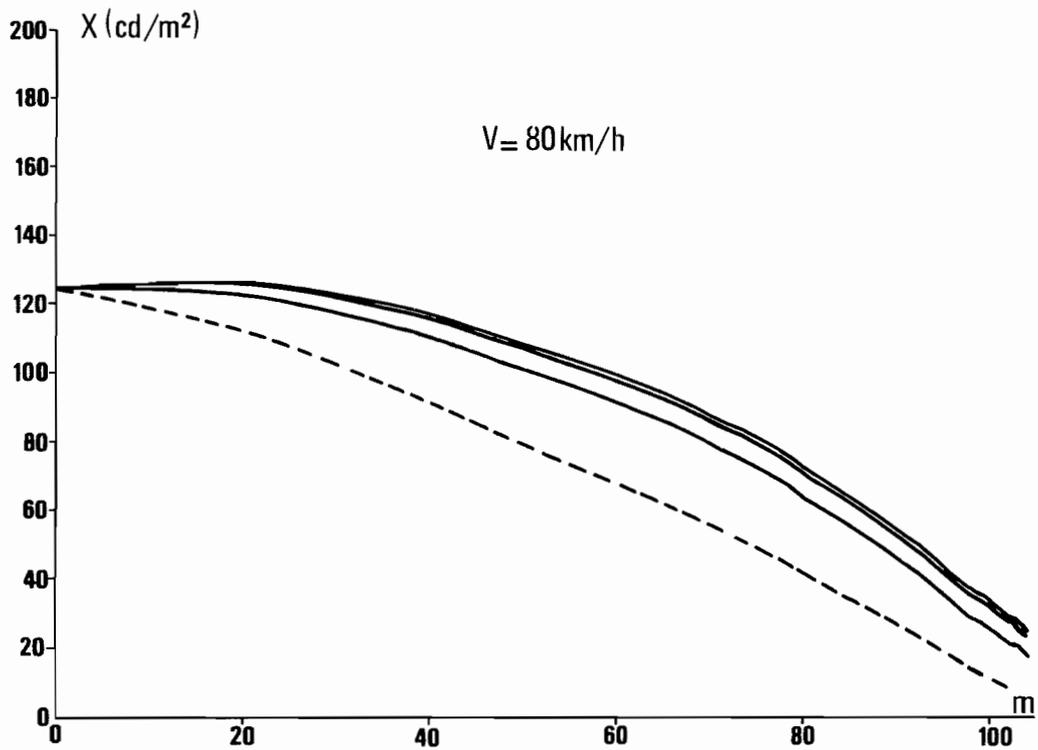


Fig. 36. – Luminance de chaussée.

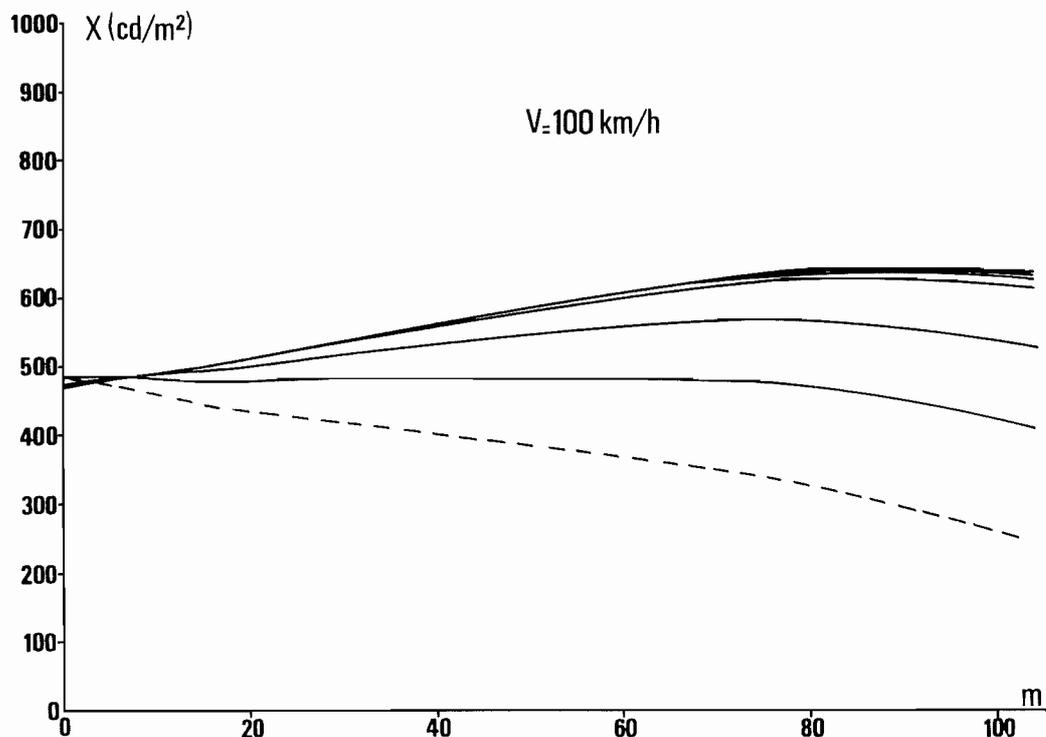


Fig. 37. – Luminance de chaussée.

b) Tunnel long bidirectionnel

Nous renvoyons le lecteur aux § 1.4.2.5. et 1.5.4.4. :

– Au § 1.4.2.5. est présentée l'étude complète du dimensionnement de la luminance nécessaire en tunnel. Les défauts d'adaptation spatiale et temporelle y sont traités pour des vitesses de 60, 80 et 100 km/h.

– Au § 1.5.4.4. on trouvera la comparaison des luminances nécessaires pour deux vitesses d'approche (80 et 100 km/h) et des systèmes d'éclairage différents. Pour plus de clarté dans la lecture des résultats, les itérations sur $[0, D_{\text{eff}}]$ ne sont pas tracées.

1.4.2. Prise en compte du défaut d'adaptation temporelle

1.4.2.1. Généralités sur le défaut d'adaptation temporelle

L'adaptation de l'œil est sa faculté d'assurer une vision correcte dans une plage énorme de luminances par l'intermédiaire d'au moins deux phénomènes :

- Variation du diamètre de la pupille (faible amplitude ≈ 6 db).
- Regroupement variable des cellules photosensibles de la rétine et plus généralement mécanismes de régulation du système nerveux (amplitude énorme, supérieure à 100 db).

L'œil est adapté à une luminance lorsque ces deux processus se sont produits.

L'adaptation d'un niveau de luminance à un autre n'est pas instantanée ; pour cette raison, on parle de défaut d'adaptation temporelle. Celui-ci se caractérise par une gêne produite par l'apparition d'images ou de taches de couleur et par une certaine diminution des performances de perception.

Pour savoir comment pallier ce défaut, il faut connaître les variations de luminance subies par l'œil d'un usager abordant et traversant un tunnel. A l'heure actuelle, ce problème est encore un sujet de recherches, donc la présente méthode ne doit pas être considérée comme définitive.

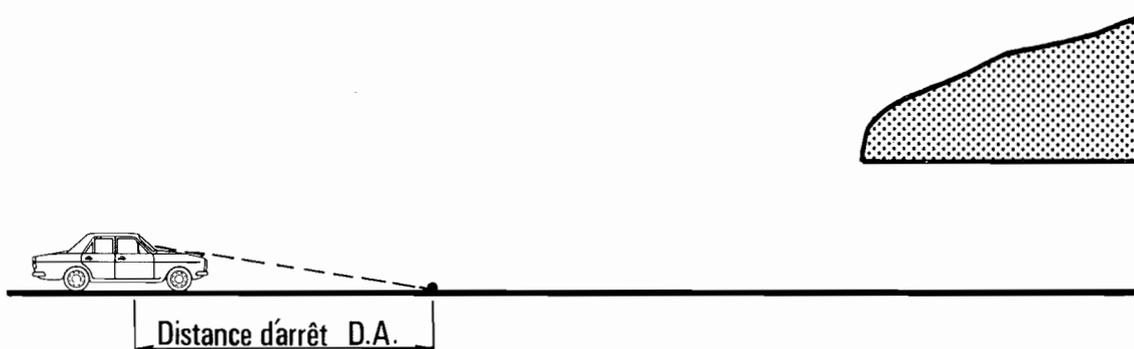
1.4.2.2. Hypothèses de base

Selon la méthode exposée au § 1.4.1., on a posé que l'utilisateur abordant un tunnel fixe son attention sur la chaussée à la distance d'arrêt devant lui. En fait, l'œil effectue plusieurs mouvements saccadés par seconde et peut regarder tout ce qui se trouve aux alentours de la route et en particulier des surfaces à très forte luminance comme le ciel. Narisada a montré (2), par des expériences, que la grande majorité des usagers à l'approche des tunnels concentraient leur attention sur l'ouvrage au moins deux cents mètres avant d'y pénétrer.

Dans une telle situation, les saccades de l'œil sont moins fréquentes et surtout, leur amplitude est beaucoup plus faible. Nous conservons donc l'hypothèse que la vision centrale de l'œil s'effectue uniquement sur la chaussée, étant bien conscients que cela conduit à un minimum de la luminance nécessaire pour lutter contre le défaut d'adaptation temporelle.

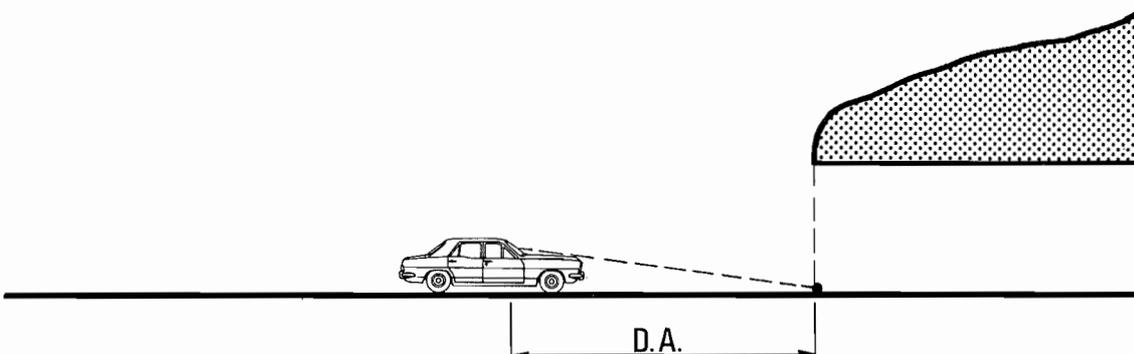
1.4.2.3. Les différentes adaptations de l'œil de l'utilisateur abordant un tunnel

a) Conducteur et point d'attention à l'extérieur du tunnel



Selon l'hypothèse retenue, la fovéa (seule partie de l'œil capable d'une résolution fine) est adaptée à la luminance rétinienne L_R , somme de la luminance de chaussée et des luminances de voiles atmosphérique, de pare-brise et de FRY. L'influence du paysage est prise en compte dans l'évaluation de L_R .

b) Le point d'attention entre dans le tunnel



On suppose que le début de la zone d'ombre est situé à l'aplomb de la tête du tunnel.

Le conducteur, fixant le point d'attention qui entre dans l'ombre, subit simultanément les défauts d'adaptation spatiale et temporelle. Dans le § 1.4.1., en négligeant le deuxième, nous avons obtenu des courbes de variation de L_R ayant l'allure donnée en figure 38.

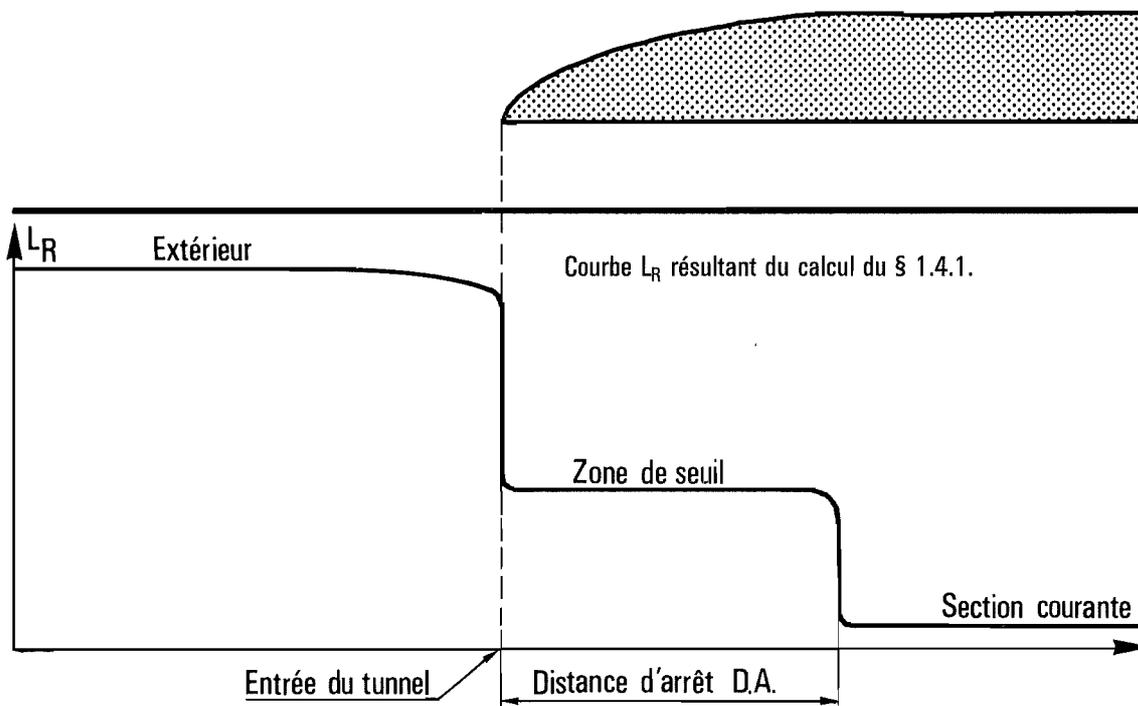
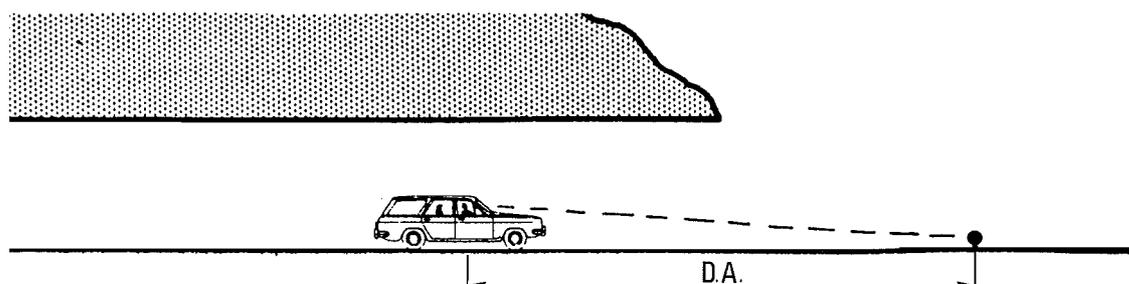


Fig. 38. – Luminance rétinienne résultant du calcul basé sur la prise en compte du défaut d'adaptation spatiale.

On constate donc deux sauts conséquents de luminance subis par l'œil :

- de L_R extérieur à L_R seuil
- de L_R seuil à L_R section courante.

c) Le point d'attention sort du tunnel



Comme on l'a dit au § 1.1.3., il se produit ici un défaut d'adaptation temporelle en général bien mieux supporté par l'œil que celui subi à l'entrée. Dans le cas de très fortes luminances extérieures cependant, on réalisera un renforcement de sortie sur une longueur allant de 50 m à 100 m suivant la vitesse effective des usagers (50 m pour 60 km/h, 100 m pour 80 km/h ou plus) et d'un niveau à déterminer par un service spécialisé en fonction du site (niveau voisin de 30 cd/m^2 en général). Ce dimensionnement n'est pas basé sur des essais précis et est susceptible d'évoluer avec les recherches futures.

1.4.2.4. Application des résultats de de BOER

Une expérience très complète effectuée par de BOER (10) a montré que, pour un œil adapté à une luminance $L = 8000 \text{ cd/m}^2$, un saut à $\frac{L}{5,5}$ en 0,2 seconde était considéré comme non gênant par 75 % des observateurs. Cela signifie que le défaut d'adaptation temporelle n'intervient que si un saut plus grand est effectué.

En toute rigueur, d'après cette expérience, il faudrait installer, dans toute la zone d'entrée, une luminance de chaussée donnant $L_R \text{ seuil} \geq L_R \text{ extérieur} / 5,5$ pour permettre à 75% des usagers une vision très confortable sans aucune impression désagréable à l'approche du tunnel.

Cela conduirait à des niveaux d'éclairage énormes (supérieurs à 20.000 lux dans les cas les plus défavorables!).

L'étude de de BOER a amené un autre résultat très important. Deux phénomènes apparaissant lors du défaut d'adaptation temporelle interviennent de la manière suivante :

- Le critère de confort (absence d'images accidentelles ou de taches de couleur) est déterminant pour la vitesse de diminution de la luminance jusqu'à une valeur d'environ 100 cd/m^2 .

- Au-dessous de 100 cd/m^2 , c'est la performance de perception qui est prépondérante.

De BOER a tracé une courbe donnant la vitesse maximale de décroissance de la luminance de la tache visuelle permettant l'adaptation temporelle de 75% des observateurs. Une représentation en est donnée en figure 39.

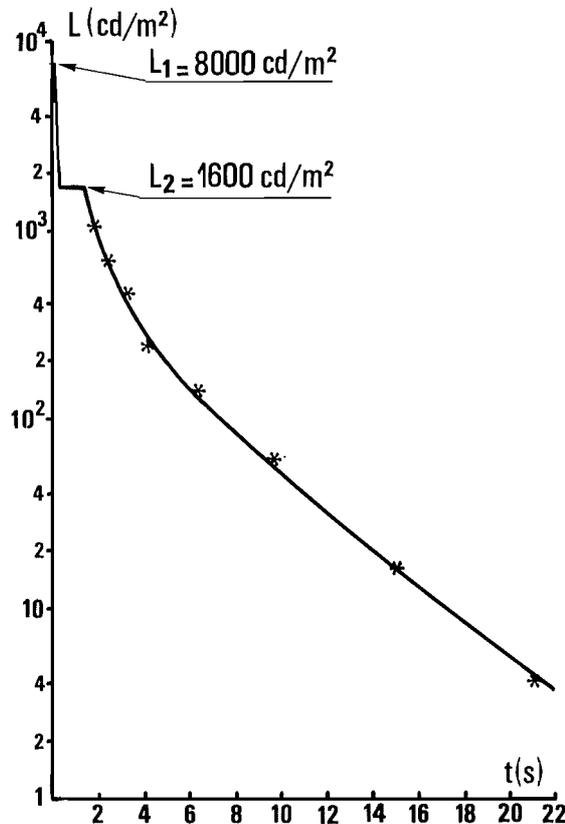


Fig. 39. – Diminution de la luminance moyenne du champ de vision avec le temps, qui est encore admissible pour 75% des observateurs. Les observateurs sont adaptés à la luminance L_1 de 8000 cd/m^2 qui en $0,2 \text{ s}$ est diminuée à la luminance L_2 de 1600 cd/m^2 .

La courbe est tracée depuis le moment où les observateurs ont effectué le réglage de la luminance du champ de vision. Le palier à 1600 cd/m^2 est donc lié aux conditions d'expérience mais n'a pas de signification intrinsèque. Ce palier ne présente pas d'importance car des courbes très similaires ont été obtenues par d'autres chercheurs alors que les observateurs étaient maîtres de la diminution de la luminance dès 8000 cd/m^2 et $t = 0$.

Compte tenu de ces résultats, nous prenons en compte le défaut d'adaptation temporelle comme l'indique le schéma de la figure 40.

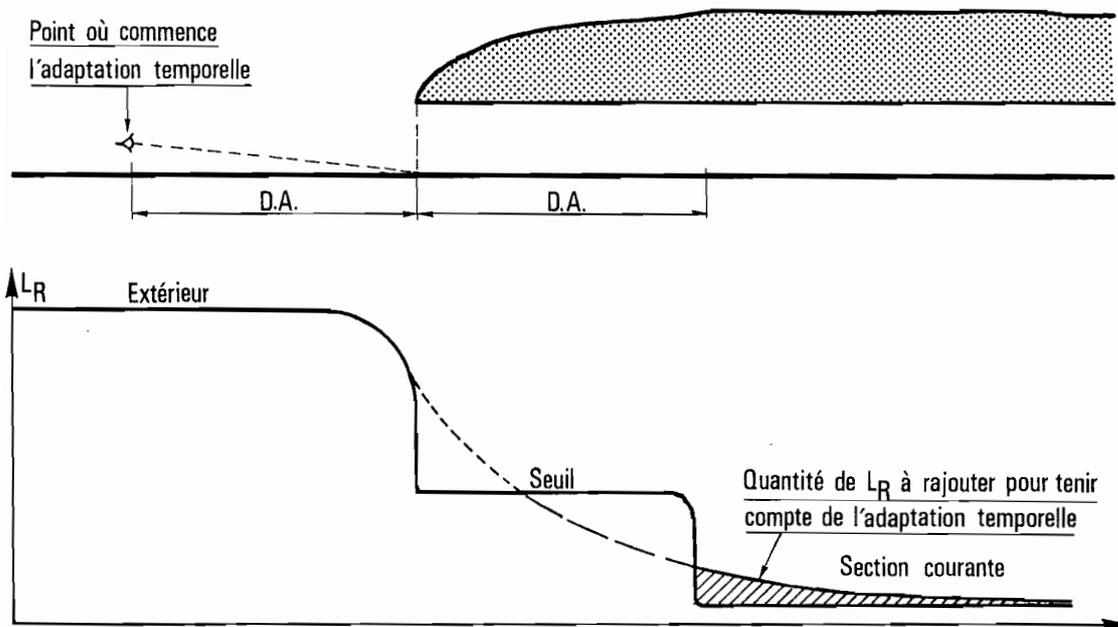


Fig. 40. – Prise en compte du défaut d'adaptation temporelle.

La première partie de la courbe de décroissance (en petits pointillés) peut être négligée car elle est très pentue et n'influe pas sur la vision d'obstacles. En effet, L_R seuil est toujours supérieur à 100 cd/m^2 en raison des luminances de voiles parasites.

La deuxième partie (en gros pointillés) est située en dessous de la valeur de L_R seuil obtenue lorsqu'on néglige le défaut d'adaptation temporelle.

Ici c'est donc l'adaptation spatiale qui détermine la luminance à installer.

La dernière partie de la courbe (en trait plein) est située au-dessus des valeurs de L_R calculées pour satisfaire l'adaptation spatiale des usagers. Dans cette zone, la vitesse de variation de luminance imposée par le défaut d'adaptation temporelle conditionne donc le niveau de luminance à installer.

1.4.2.5. Application de la méthode à un tunnel réel.

Etant donné que la performance de perception n'est affectée, selon l'expérience de de BOER, que pour des valeurs de luminance inférieures à 100 cd/m^2 , on ne compensera le défaut de luminance qu'à partir de cette valeur de 100 cd/m^2 en faisant suivre à L_R la décroissance de la courbe de de BOER.

La quantité de lumière à rajouter dépend évidemment des cas.

Nous donnons, pour un même tunnel et donc des luminances de voiles parasites identiques, les courbes de luminance nécessaire en tunnel avec un système classique d'éclairage à flux dirigé en tenant compte tout d'abord du seul défaut spatial puis du défaut temporel d'adaptation.

La seule différence, dans les trois cas, est la vitesse effective des usagers : 60, 80 et 100 km/h.

Pour le tunnel choisi, le voile de FRY (fig. 41) est relativement faible, par contre la luminance atmosphérique est forte (fig. 42).

La luminance rétinienne de l'utilisateur à l'extérieur peut être estimée à 2000 cd/m^2 .

1^{er} cas : figures 43 à 46

Vitesse effective = 60 km/h correspondant à une distance d'arrêt de 70 m.

– La courbe de la figure 43 représente la luminance nécessaire en tunnel pour combattre le défaut d'adaptation spatiale. Les itérations du calcul sur $[0, D_{\text{eff}}]$ sont représentées.

On constate que les niveaux requis sont très faibles (maximum à 36 cd/m^2).

– A partir de ces valeurs de luminance de chaussée, on peut tracer l'évolution de la luminance rétinienne de l'utilisateur situé à la distance d'arrêt du point d'attention. C'est la courbe L_R de la figure 44.

Sur cette même figure, nous avons représenté la diminution maximale admissible de cette luminance rétinienne selon de Boer pour une vitesse de 60 km/h et à partir de L_R extérieur = 2000 cd/m^2 . Cette deuxième courbe est au-dessus de la première. L'interprétation de nos résultats nous conduit à ajouter à L_R , à partir de $L_R = 100 \text{ cd/m}^2$ c'est-à-dire à l'abscisse 53 m la quantité $100 - L_R$ jusqu'à l'abscisse 62 m, point à partir duquel on ajoute $[L (\text{expérience de BOER}) - L_R]$ à L_R .

Le complément de luminance rétinienne nécessaire est représenté par la zone hachurée sur la figure.

– Il faut récupérer sur la luminance de chaussée le supplément de luminance rétinienne que l'on vient de déterminer.

Il faudrait, en toute rigueur, effectuer un nouveau calcul par itération afin de dissocier la luminance intrinsèque des luminances de voiles exactes qu'elle crée. En fait et compte tenu des approximations déjà faites sur la quantification du défaut temporel, on peut se contenter de rajouter à la valeur de luminance de chaussée tracée en figure 43, 80% de l'accroissement calculé pour L_R . Ceci nous donne la courbe de la figure 45.

On remarque que, compte tenu des hypothèses retenues, on a une forte augmentation de luminance à partir de l'abscisse où l'on commence à prendre en compte le défaut temporel.

Le point culminant est voisin de l'abscisse 70 m ce qui correspond à l'entrée de l'utilisateur dans le tunnel. On retrouve donc quantitativement que le défaut temporel est prépondérant et maximum au moment où l'observateur pénètre dans l'ouvrage.

A partir de l'abscisse 70 m environ, la luminance subit la décroissance imposée par l'expérience de de BOER pour donner une valeur de 7 cd/m^2 à 200 m de l'entrée.

– Enfin, la figure 46 représente la courbe de luminance retenue pour cette entrée de tunnel compte tenu des prises en compte de tous les phénomènes décrits ci-dessus. Le fait de réaliser un premier palier de 60 cd/m^2 environ sur 70 m va dans le sens de la sécurité et ne doit pas être considéré d'un coût prohibitif.

Afin d'avoir un élément de comparaison fiable, nous allons considérer le même ouvrage pour lequel une vitesse effective de 80 km/h serait retenue.

2^e cas : figures 47, 48 et 49.

Vitesse effective = 80 km/h correspondant à une distance d'arrêt de 105 m.

Les courbes se lisent comme pour le premier cas.

On voit que les niveaux requis pour lutter contre le seul défaut d'adaptation spatiale (figure 47) sont très nettement supérieurs à ceux du cas n° 1 (figure 43).

La luminance à rajouter à L_R pour combattre le défaut temporel (zone hachurée de la figure 48) est, en proportion, beaucoup plus faible que dans le cas n° 1. Noter qu'évidemment la courbe inspirée de l'expérience de de Boer a la même origine L extérieur = 2000 cd/m^2 que dans le cas n° 1 mais est tracée pour un usager roulant à 80 km/h et non plus à 60 km/h.

La figure 49 représente la courbe de luminance de chaussée retenue comme définitive pour le projet. Elle diffère très peu de la courbe de la figure 47. La légère remontée entre 105 et 110 m sera prise en compte lors de la conception des paliers de renforcement, une quatrième courbe représentant les valeurs finales retenues n'est donc pas utile.

Sur cet exemple précis, on voit qu'à 80 km/h le défaut temporel devient très secondaire devant le défaut spatial en raison de l'énorme influence de la distance d'arrêt.

3^e cas : figures 50 et 51

Vitesse effective = 100 km/h correspondant à une distance d'arrêt de 160 m.

On retrouve l'influence de la vitesse sur la luminance nécessaire pour combattre le défaut d'adaptation spatiale (figure 50). Les niveaux requis sont très élevés (maximum environ quinze fois supérieur à celui obtenu pour $V_{eff} = 60$ km/h).

La luminance rétinienne correspondante (figure 51) assure une adaptation temporelle nettement supérieure aux exigences formulées précédemment. Le défaut d'adaptation temporelle est donc négligeable à cette vitesse et bien sûr aux vitesses supérieures.

Si l'on avait retenu une luminance rétinienne extérieure de 4000 cd/m^2 , le problème aurait été tout à fait équivalent. En effet, une valeur L_R extérieure forte correspond à une luminance de voile de FRY élevée et donc à une pénalisation bien plus importante à grande vitesse, du point de vue spatial que du point de vue temporel.

Au vu de ces résultats quantitatifs, on peut dire que, quel que soit l'ouvrage, pour des vitesses d'approche supérieures à 80 km/h, la luminance nécessaire pour lutter contre le défaut spatial est telle que l'utilisateur est toujours adapté temporellement.

Adaptation temporelle et systèmes à mobilisation de contraste

Afin de compléter ces résultats, nous donnons, toujours pour le même tunnel et une vitesse effective de 100 km/h, les niveaux de luminance nécessaires en utilisant un système à mobilisation de contraste (voir § 1.5.).

Celui-ci permet de prendre, pour une vitesse de référence de 80 km/h, une luminance de référence égale à $7 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2$ donnant une visibilité des obstacles éventuels aussi bonne que 1 cd/m^2 avec un éclairage à flux dirigé classique.

Les résultats obtenus sont donnés en figures 52 à 55 et se lisent de la même manière que ceux des cas précédents.

La comparaison des figures 50 et 52 montre (comme on le verra au § 1.5.4.4.) l'économie énorme que l'on peut réaliser en utilisant les systèmes à mobilisation de contraste pour le renforcement d'entrée lors de vitesses effectives élevées (ici 100 km/h). Cependant, il faut vérifier qu'étant donnés les bas niveaux requis pour combattre le défaut d'adaptation spatiale, l'adaptation temporelle ne nécessite pas un supplément d'éclairage important. Les figures 53 et 54 montrent qu'il n'en est rien.

La figure 53 donne la courbe de luminance définitive retenue.

On verra au § 1.5. que les systèmes à mobilisation de contraste ne sont pas bien adaptés à la section courante. Sur l'exemple précis, on peut envisager un raccordement à un système à flux dirigé classique à 250 m de l'entrée, le niveau requis étant alors proche de celui de la section courante.

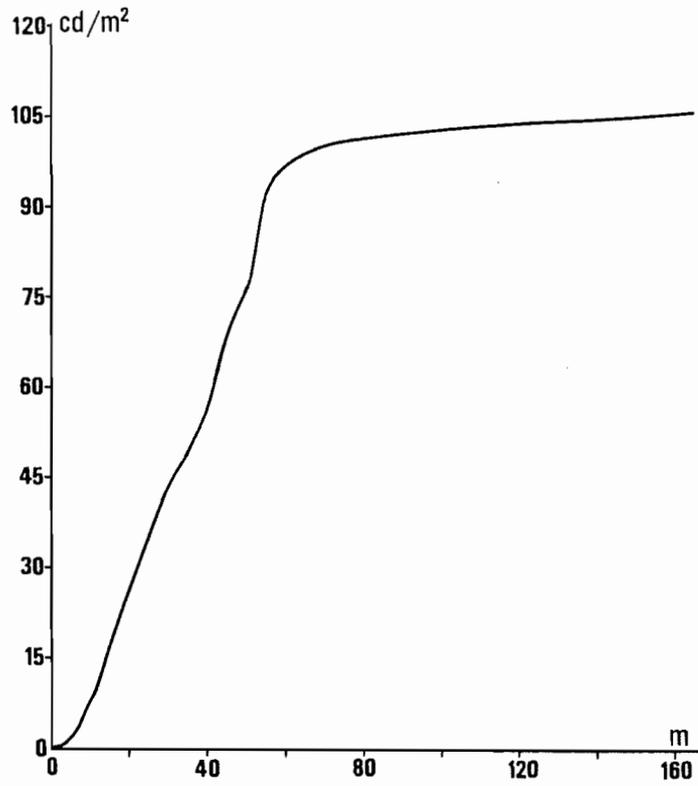


Fig. 41. – Luminance de voile de FRY.

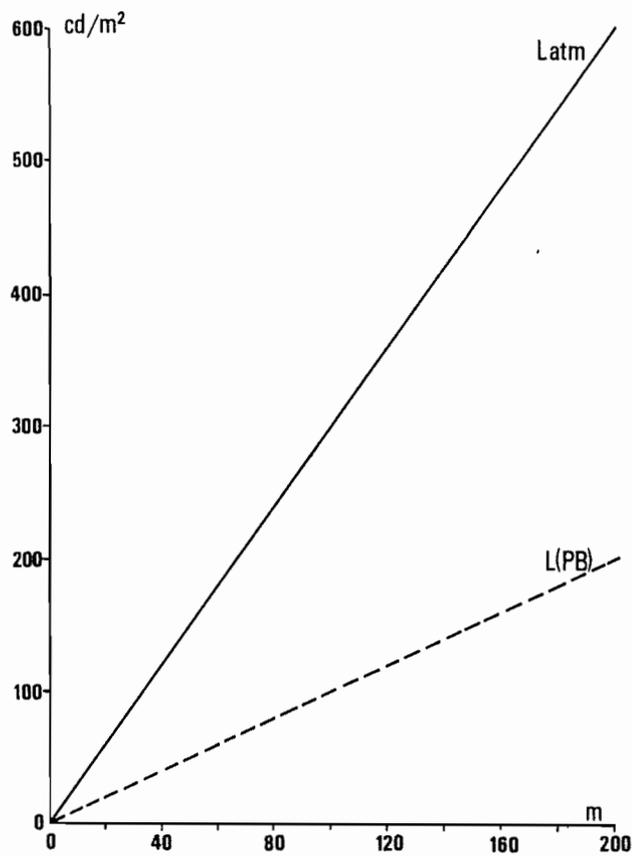


Fig. 42. – Luminances de voiles atmosphérique et de pare-brise.

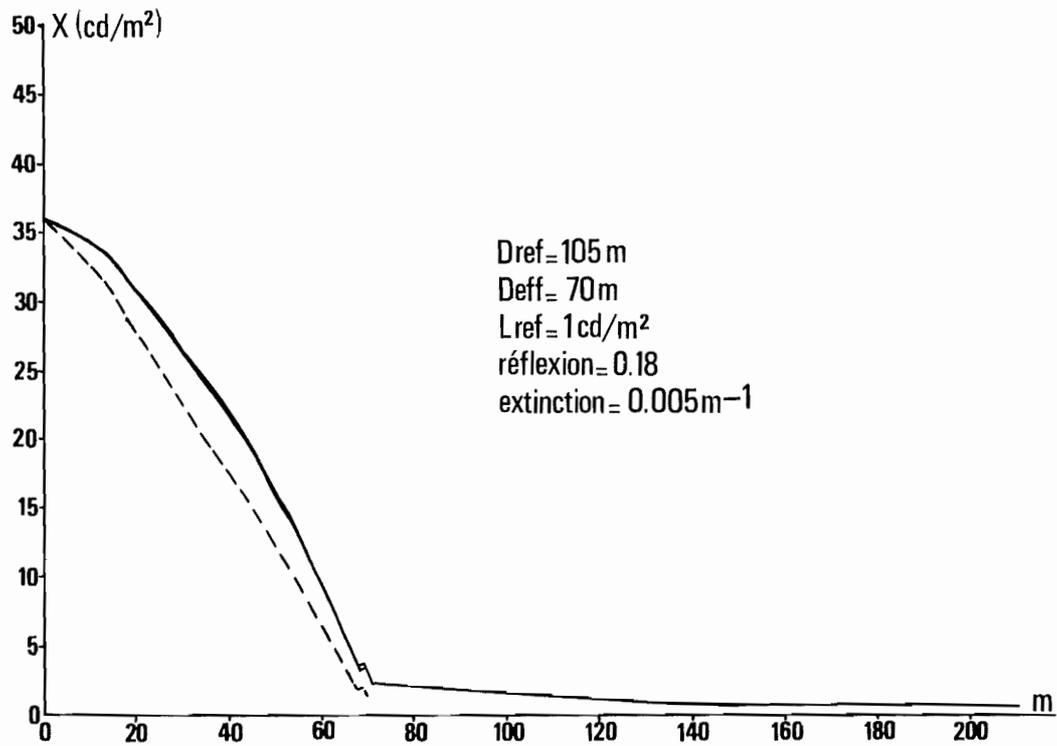


Fig. 43. – Luminance de chaussée avec la seule prise en compte du défaut d'adaptation spatiale $V_{eff} = 60 \text{ km/h}$.

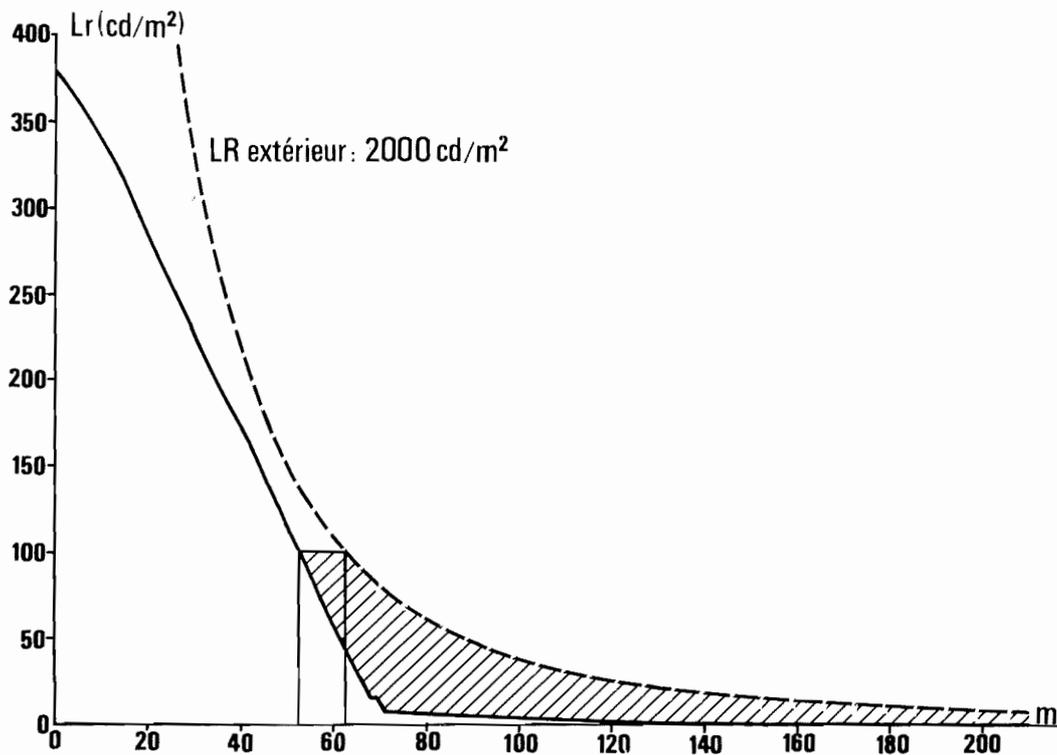


Fig. 44. – Courbe pleine : luminance rétinienne résultant du calcul précédent. Courbe en pointillé : décroissance maximale admissible pour tenir compte de l'adaptation temporelle correspondant à une luminance rétinienne extérieure de 2000 cd/m^2 .

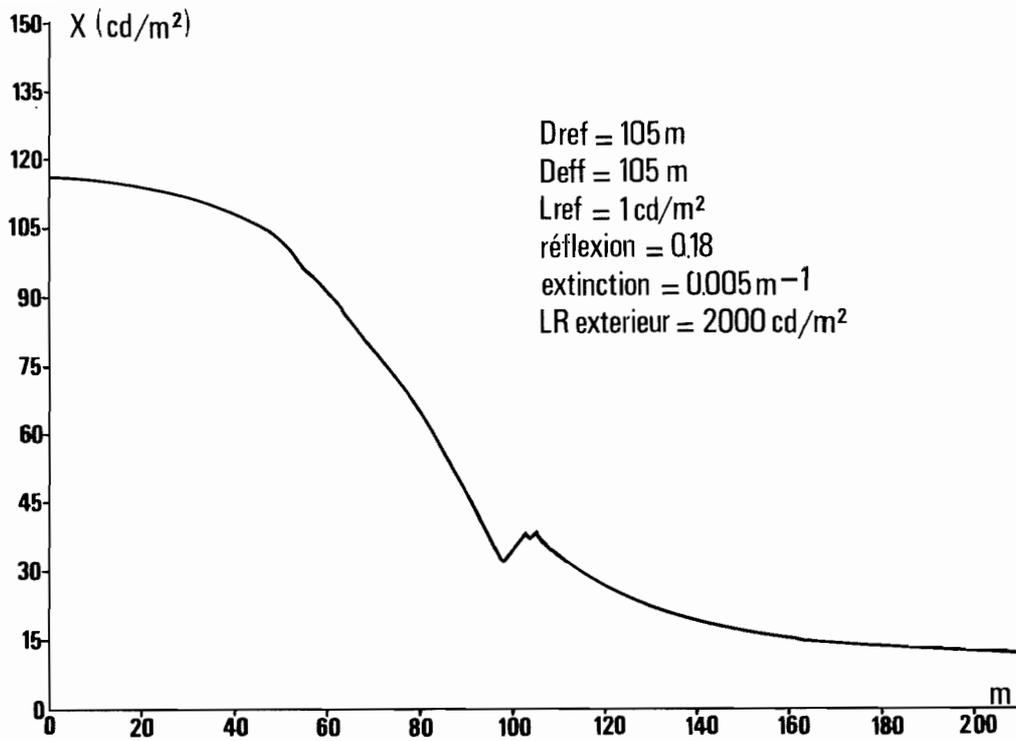


Fig. 49. – Idem fig. 45 avec $V_{eff} = 80 \text{ km/h}$.

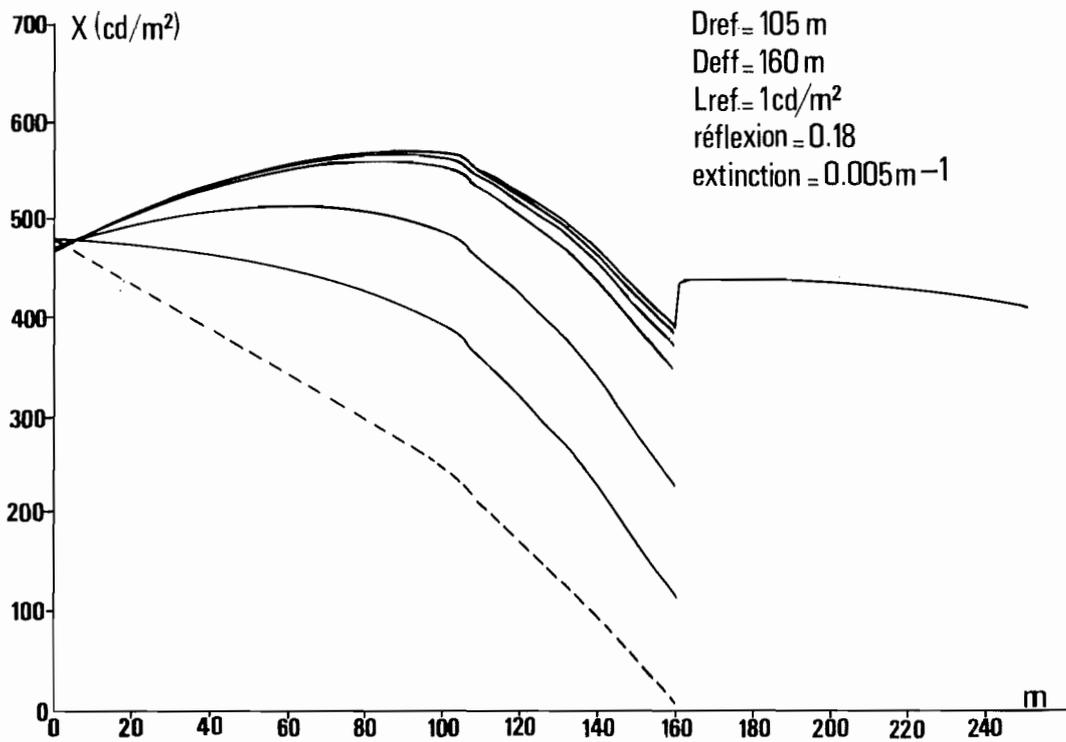


Fig. 50. – Idem fig. 43 avec $V_{eff} = 100 \text{ km/h}$.

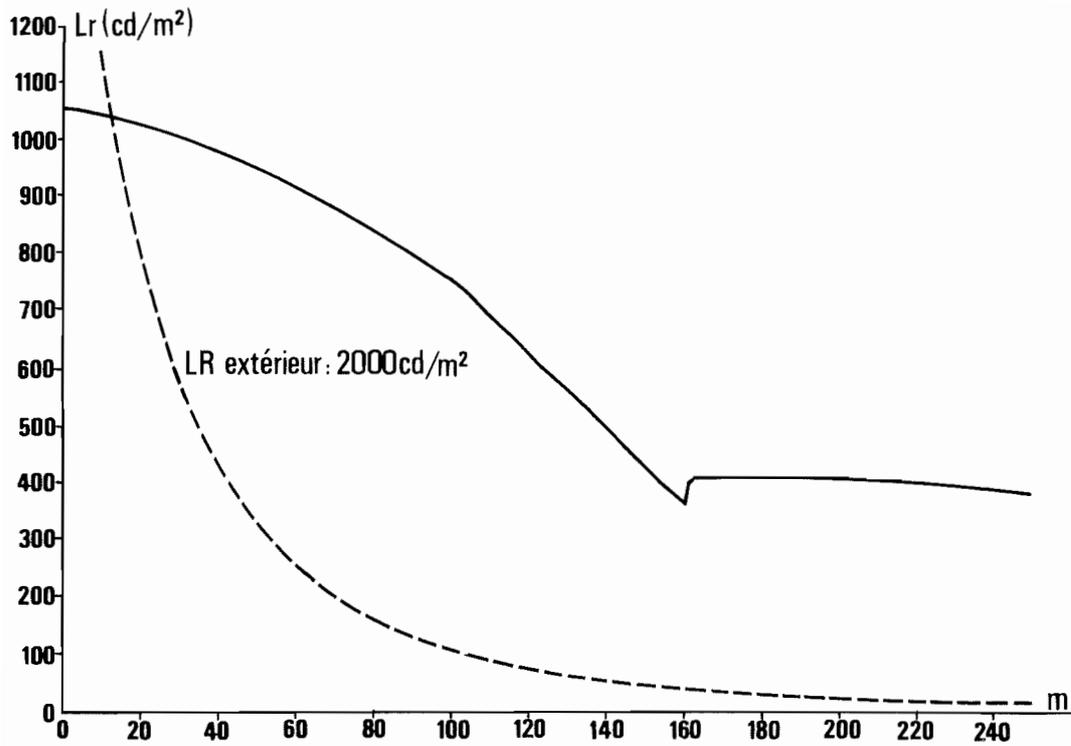


Fig. 51. – Idem fig. 44 avec $V_{eff} = 100$ km/h.

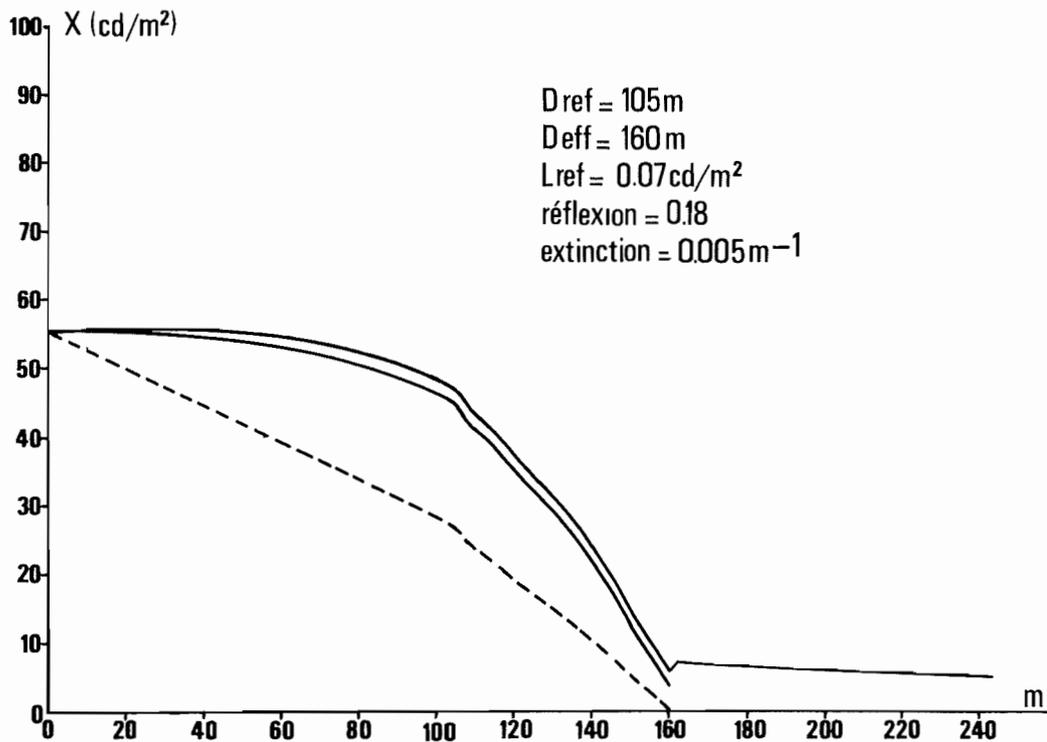


Fig. 52. – Idem fig. 50 mais avec un système à mobilisation de contraste.

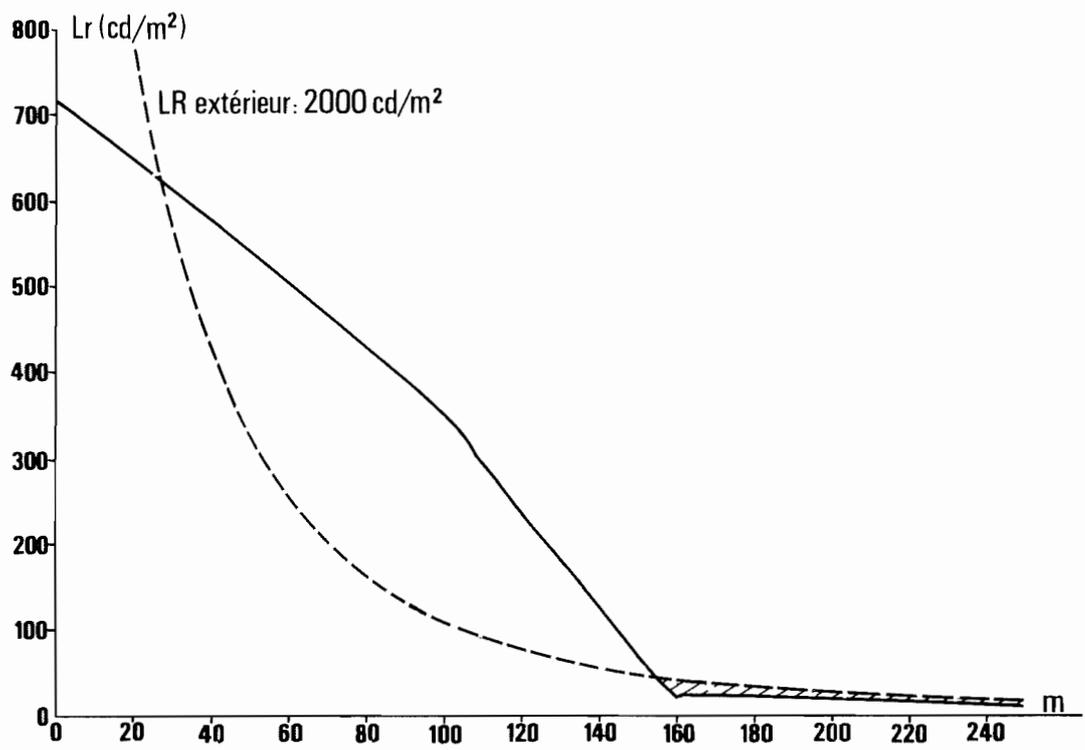


Fig. 53 . – Idem fig. 51 mais avec un système à mobilisation de contraste.

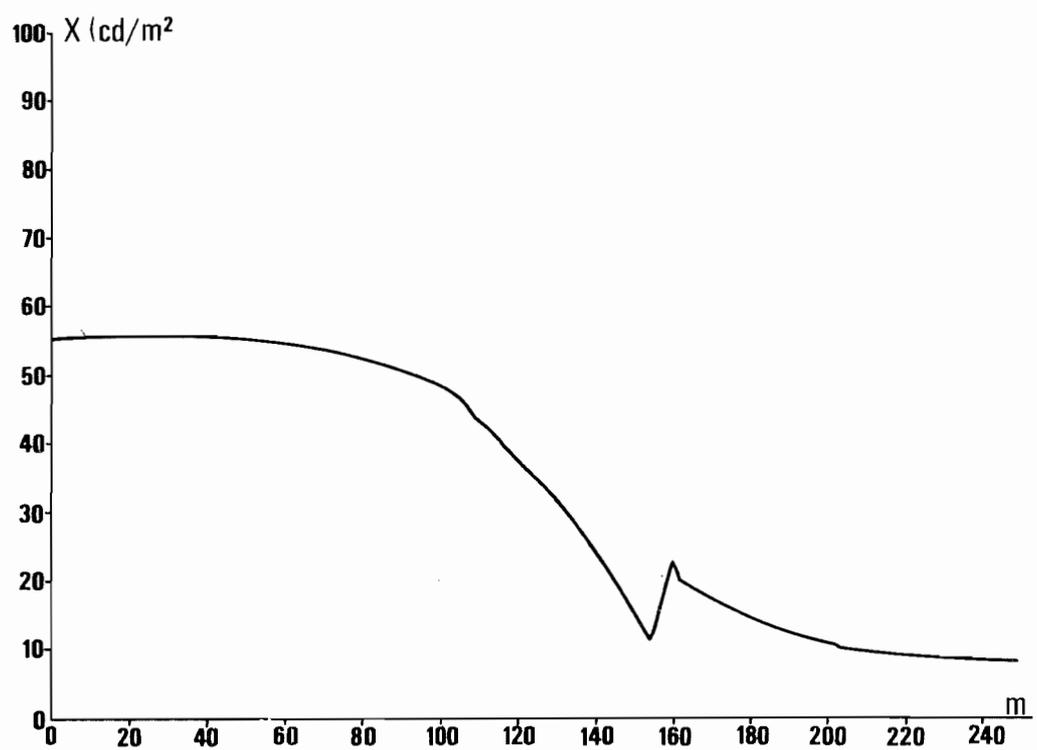


Fig. 54. – Le supplément de luminance pour tenir compte de l'adaptation temporelle est minime.

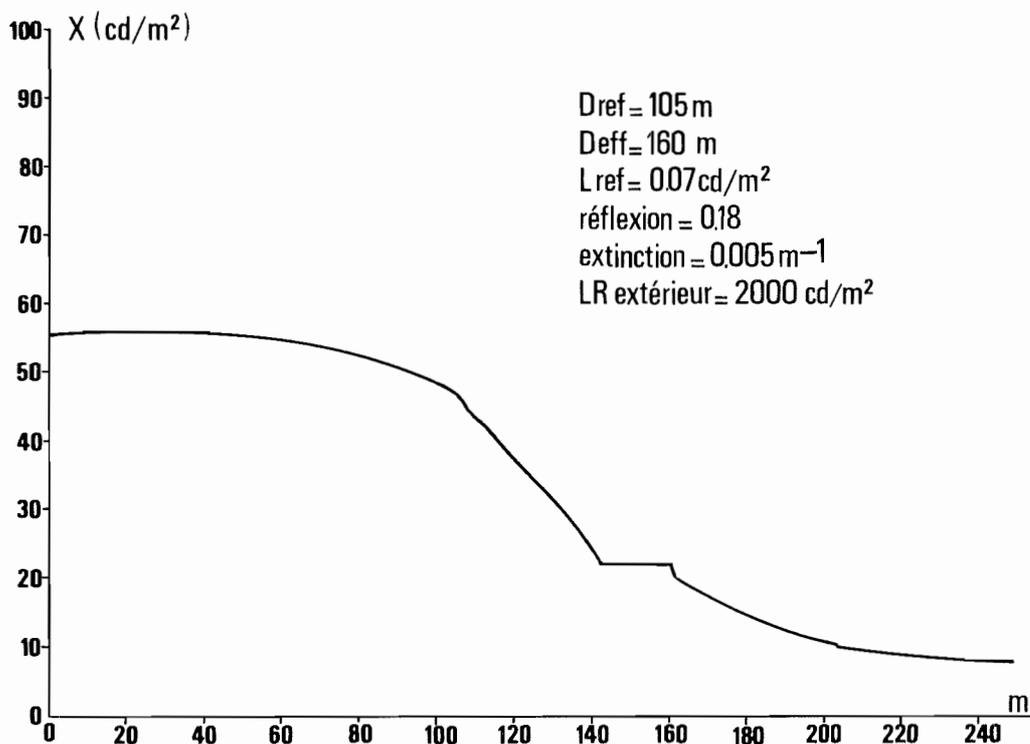


Fig. 55. – Luminance finale retenue. Sa comparaison avec la courbe de la figure 50 montre tout l'intérêt des systèmes à mobilisation de contraste pour les V_{eff} élevés.

1.4.3. Détails pratiques

1.4.3.1. Exécution des relevés.

On doit évaluer les luminances de voiles L_{F_o} , L_{atm_o} et L_{PB_o} (cf. § 1.4.1.3.) nécessaires au calcul de la luminance de chaussée dans la zone d'entrée de l'ouvrage.

Les valeurs retenues doivent être représentatives des situations les plus souvent rencontrées par les usagers abordant le tunnel. Il faut, pour cela, que le site sur lequel sont effectuées les mesures soit peu différent de celui qui sera vu par les conducteurs et que les conditions photométriques soient judicieusement choisies.

a) Prise en compte de la modification du site

Il s'agit, dans la plupart des cas, du problème suivant :

Les mesures de voile de FRY doivent être antérieures au projet d'éclairage et parfois, le site est à l'état de chantier, voire vierge de toute trace du futur ouvrage. Les mesures sont alors moins représentatives et il y a lieu d'effectuer des corrections. On dispose pour cela de la tabulation de l'intégrale de FRY et des mesures de luminance des différentes parties du paysage. Si les modifications prévisibles sont très importantes (cas des trémies urbaines par exemple) les corrections sont difficiles et sujettes à caution. Dans la plupart des cas cependant, elles se résument à la prise en compte du percement du tunnel en procédant de la façon suivante :

1) Mesure du voile de FRY sur le site où le tunnel n'est pas encore percé et mesure de la luminance L_1 à l'endroit où le tunnel sera percé (schéma 1). L_1 est la moyenne des mesures de luminance sur la section intéressée.

2) On attribue au droit du futur percement du tunnel une valeur L_2 (en général inférieure à L_1) que l'on prendra au maximum égale à 100 cd/m^2 . L_2 est la moyenne des luminances sur la section considérée sans éclairage artificiel (schéma 2).

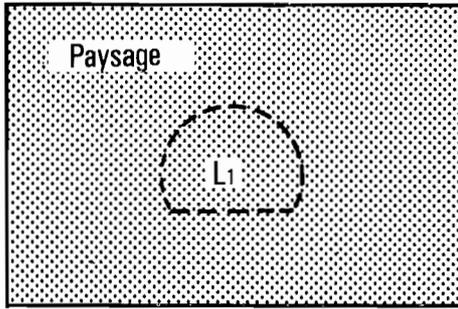


Schéma 1

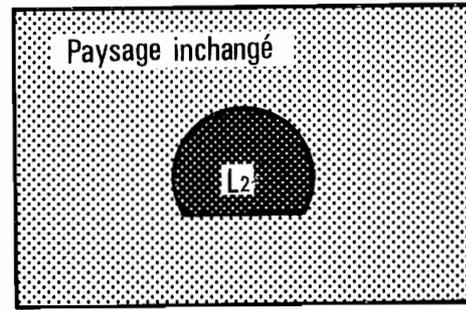


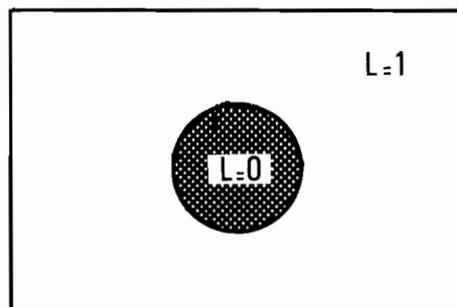
Schéma 2

3) On assimile l'ouverture du tunnel à un disque de même surface et on calcule l'intégrale de FRY sur ce disque.

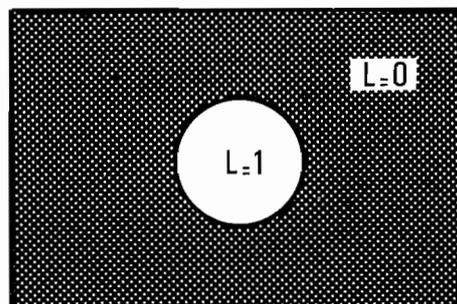
La distribution de la luminance prise en compte dans cette intégrale est évidemment $L_2 - L_1$. En ajoutant la valeur obtenue (en principe négative) au voile de FRY mesuré, on obtient le voile de FRY tenant compte du percement du tunnel.

Nous joignons (fig. 56) la tabulation de l'intégrale de FRY degré par degré et dans les cas suivants :

– **Nul à l'intérieur** : l'angle sous lequel est vu le disque est fixé et on suppose la luminance nulle à l'intérieur et égale à 1 à l'extérieur :



– **Nul à l'extérieur** : de même que précédemment mais avec $L = 0$ à l'extérieur du disque et $L = 1$ à l'intérieur :



Cette représentation permet l'étude de tous les cas lorsqu'on se ramène à des plages de luminance uniforme.

Fig. 56. – Tabulation de l'intégrale de FRY.

NUL A L'EXTERIEUR		NUL A L'INTERIEUR	
ANGLE (°)	FRY	ANGLE (°)	FRY
1	0.0127	1	0.0732
2	0.0211	2	0.0653
3	0.0273	3	0.0592
4	0.0323	4	0.0543
5	0.0365	5	0.0502
6	0.0400	6	0.0467
7	0.0431	7	0.0436
8	0.0458	8	0.0409
9	0.0483	9	0.0385
10	0.0505	10	0.0362
11	0.0525	11	0.0342
12	0.0544	12	0.0323
13	0.0561	13	0.0306
14	0.0577	14	0.0290
15	0.0592	15	0.0275
16	0.0606	16	0.0261
17	0.0619	17	0.0248
18	0.0631	18	0.0236
19	0.0643	19	0.0224
20	0.0654	20	0.0213
21	0.0664	21	0.0203
22	0.0674	22	0.0193
23	0.0683	23	0.0184
24	0.0692	24	0.0175
25	0.0700	25	0.0166
26	0.0708	26	0.0158
27	0.0715	27	0.0151
28	0.0723	28	0.0143
29	0.0729	29	0.0136
30	0.0736	30	0.0130
31	0.0742	31	0.0123
32	0.0748	32	0.0117
33	0.0754	33	0.0111
34	0.0759	34	0.0106
35	0.0764	35	0.0100
36	0.0769	36	0.0095
37	0.0774	37	0.0090
38	0.0778	38	0.0086
39	0.0782	39	0.0081
40	0.0787	40	0.0077
41	0.0790	41	0.0073
42	0.0794	42	0.0069
43	0.0798	43	0.0065
44	0.0801	44	0.0061
45	0.0804	45	0.0058

b) Variations des conditions ambiantes

La difficulté vient du fait que les performances visuelles sont étroitement liées aux conditions photométriques sans cesse en évolution. Le choix d'un instant de mesure ne conduit donc qu'à un cas particulier.

Le projet devant répondre à la plus grande partie des situations rencontrées par les usagers, il s'agit de retenir des données sécuritives mais tout de même conduisant à un dimensionnement économique. L'interprétation des mesures effectuées est donc très importante. Rappelons que c'est à ce stade de l'étude que le spécialiste rend les plus grands services car il repérera très vite les cas les plus défavorables en fonction du site.

Dans son dernier rapport technique (11), la C.I.E. insiste sur le fait que chaque tunnel est un cas particulier et mérite à ce titre des études spécifiques.

Il n'y a donc pas de recette particulière mais nous pouvons donner les quelques conseils généraux suivants :

– Dès que la décision d'un projet de tunnel routier est prise, il faut repérer, en fonction de l'orientation et de la saison, s'il existe des cas très difficiles pour la vision des usagers (soleil rasant face aux yeux du conducteur...). Il faut aussi déceler les heures et saisons les plus défavorables afin d'orienter les campagnes de mesures. Celles-ci ont pour but de renseigner le projeteur sur l'évolution des conditions photométriques dans le temps.

Un tel procédé permet d'établir un projet très fiable.

– On ne peut pas toujours, faute de temps ou de moyens, effectuer ce suivi. Les relevés sur quelques jours de beau temps et à des heures différentes permettent à un spécialiste de déceler le ou les cas les plus défavorables pour l'éblouissement.

Pour tenir compte des variations saisonnières, en première approximation, et suivant le site, on pourra multiplier le voile de FRY mesuré sous certaines conditions pour obtenir celui engendré par un éclairage plus fort. Cette approche est d'ailleurs similaire à celle de l'éclairage naturel des bâtiments où l'on ramène le problème de l'évaluation de la luminance des baies vitrées verticales à une mesure d'éclairage horizontal.

On devra être très prudent en appliquant cette règle de trois. En effet, il existe deux causes principales d'éblouissement :

1°) L'environnement de la tête du tunnel est très éclairé par le soleil qui n'est pas dans le champ périphérique proche de l'usager, par exemple tête sud d'un tunnel de montagne. L'éblouissement est alors proportionnel à l'éclairage naturel reçu par ce paysage.

2°) L'environnement immédiat du tunnel est assez sombre et le soleil est en face de l'usager. Ce cas est beaucoup plus difficile à traiter car l'éblouissement dépend de la position de cette source intense mais de faibles dimensions. Ainsi, pour certains sites, la situation la plus défavorable peut se produire en hiver.

En ce qui concerne le voile atmosphérique, la dispersion des valeurs est aussi très grande. Cependant, on s'attache à effectuer des mesures uniquement par très beau temps car c'est la combinaison de tous les voiles parasites qui donne la situation la plus défavorable.

1.4.3.2. *Commande des différents régimes*

Il est nécessaire d'installer plusieurs régimes de renforcement d'entrée pour des raisons évidentes d'économie.

On retient en général :

- 1 régime dit de plein soleil fonctionnant lorsque les conditions photométriques sont les plus défavorables.
- 1 régime jour " normal "
- 1 régime jour " couvert " éventuellement.

Le passage de l'un à l'autre s'effectue par une cellule de commande tenant compte des voiles parasites qui gênent le conducteur abordant le tunnel. Cette commande devrait donc être assurée par un luminancemètre équipé d'une lentille de FRY située à une distance égale à la distance d'arrêt de la tête de l'ouvrage et **regardant celle-ci**.

La maintenance d'un tel appareil ne serait pas aisée et son coût d'investissement beaucoup plus lourd que celui d'une cellule photoélectrique.

On peut utiliser, avec une précision tout à fait acceptable une cellule photoélectrique munie d'une lentille mesurant l'éclairage reçu dans un champ de deux fois dix degrés regardant l'entrée du tunnel. Un étalonnage est nécessaire afin que les passages d'un régime à un autre s'effectuent bien lorsque les conditions photométriques le justifient.

1.4.3.3. Fixation de la luminance de situation de référence (L_{ref}) en fonction de la vitesse de référence (V_{ref})

Comme on l'a vu précédemment (cf. § 1.2. et 1.4.1.) le principe de base de cette méthodologie est d'assurer un seuil de visibilité, tout au long du tunnel, égal à celui procuré par une situation choisie comme référence.

On a montré de même (cf. § 1.2.) que l'on pouvait définir une expérience de visibilité par quatre variables qui sont :

- Le temps de présentation de l'objet à voir (t) ;
- La luminance du fond entourant l'objet (L_R) telle qu'elle est perçue par la rétine ;
- Le contraste des luminances (telles qu'elles sont perçues par la rétine) entre le fond et l'objet (C_R) ;
- La taille (ou le diamètre apparent) de l'objet (ϵ).

Les lois que nous avons utilisées sont toutes applicables lorsque le temps de présentation est infini.

Dans la réalité, celui-ci peut être très court et la méthode conduit donc à un minorant de la luminance requise.

Une fois le temps de présentation choisi, le triplet (L_R , C_R , ϵ) est suffisant pour définir une situation de visibilité.

Les niveaux de luminance et par conséquent la puissance consommée sont très élevés dans la zone de renforcement des tunnels. Ils doivent donc être équivalents à une situation de référence permettant un seuil de visibilité juste suffisant pour assurer la sécurité des usagers.

Comme on l'a vu au § 1.2., cette référence est choisie en section courante, suffisamment loin de la zone d'entrée pour que l'usager soit parfaitement adapté temporellement. Les besoins y sont sensiblement les mêmes qu'en éclairage public, où les luminances de chaussée recommandées varient suivant les pays de 0,5 à 4 cd/m^2 (en France, les recommandations de l'AFE (12) donnent une plage de 0,5 à 2 cd/m^2 selon la catégorie de la voie à éclairer).

D'autres travaux et en particulier un article de J. VALIN (13) nous permettent de choisir une luminance de référence $L_{ref} = 1 \text{ cd/m}^2$ pour un usager roulant à 80 km/h et dans le cas d'un éclairage à distribution de flux symétrique. Nous verrons dans le § 1.5. la possibilité de diminuer cette valeur de L_{ref} en changeant la configuration de l'éclairage.

Rappelons que la fixation de ce niveau de référence est très importante car elle entraîne un seuil de visibilité qui, pour être conservé tout au long du tunnel, peut conduire à des puissances installées très importantes au droit du renforcement d'entrée.

Le choix d'une luminance de référence plus faible conduit à des installations plus économiques mais au détriment de la sécurité des usagers qui, alors, n'ont même plus les seuils de visibilité qu'ils auraient la nuit, tous feux éteints, en roulant sur une chaussée normalement éclairée. Il n'est donc absolument pas conseillé par le C.E.Tu.

1.4.3.4. Influence de la vitesse effective des usagers sur la luminance de chaussée nécessaire

a) Les causes de cette influence

Cette influence est énorme pour deux raisons :

- Le principe de l'éclairage des tunnels, une fois le système choisi, est de rattraper une perte de visibilité, caractérisée par un affaiblissement du contraste, en augmentant la luminance de chaussée. Nous avons vu (cf. § 1.2.) qu'aux niveaux couramment rencontrés dans les zones d'entrées des tunnels, une très faible diminution du contraste entraîne une très forte augmentation de luminance pour que le seuil de visibilité soit conservé.
- Selon la loi de RICCO, une augmentation de la distance d'arrêt équivalente à une diminution du diamètre apparent de l'objet à détecter peut se traduire par une chute de contraste selon le ratio $C\epsilon^2 = \text{constante}$.

Cela signifie par exemple que le doublement de la distance d'arrêt est équivalent à une diminution de contraste de un à un quart toutes choses égales par ailleurs. Il faut rajouter à cela l'augmentation de la luminance de voile atmosphérique due à l'allongement du trajet œil-point d'attention.

On conçoit ainsi que l'influence finale sur le niveau de luminance nécessaire soit très importante.

b) Exemple de l'ordre de grandeur

Nous l'illustrerons par une seule figure représentant, pour un cas fictif de luminances de voiles choisies volontairement faibles et une luminance de référence de $0,5 \text{ cd/m}^2$, les luminances nécessaires sur les 600 premiers mètres d'un tunnel pour des vitesses de parcours de la plus basse à la plus haute : 40, 60, 80, 100, 120 km/h : figure 57.

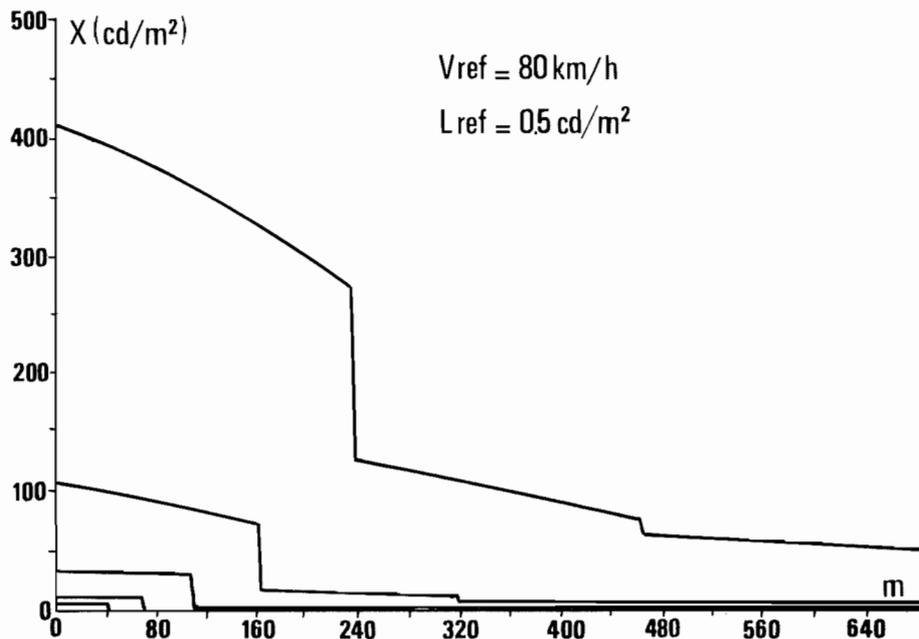


Fig. 57. – Influence de la vitesse effective sur le défaut d'adaptation spatiale via la distance d'arrêt.

Remarque importante : cette figure ne tient pas compte de l'adaptation temporelle.

c) Applications possibles

- Certains tunnels très peu circulés peuvent justifier une limitation de vitesse afin de réduire les frais d'investissement et d'exploitation d'éclairage.
- Des ouvrages situés sur routes montagneuses très sinueuses peuvent être peu éclairés en raison de la très faible vitesse des usagers.

1.5. MOBILISATION DE CONTRASTE

1.5.1. Importance du contraste pour la vision d'obstacles à l'entrée des tunnels routiers

Nous avons rappelé au § 1.2.4. la courbe R.C.S. (3) permettant de relier le contraste et la luminance d'objets au seuil de visibilité pour une expérience donnée.

Nous donnons à nouveau en fig. 58 une représentation de la R.C.S. standard.

D'après la forme de cette courbe, on remarque qu'aux niveaux de luminances couramment rencontrés en zones de renforcement d'entrée de tunnels (autour de 100 cd/m²), une très faible variation de contraste entraîne une variation très sensible de luminance afin de rester au seuil de visibilité. Il paraît donc plus logique de chercher à améliorer le contraste que d'augmenter la luminance de chaussée par un éclairage plus puissant (donc plus coûteux en investissement et en exploitation).

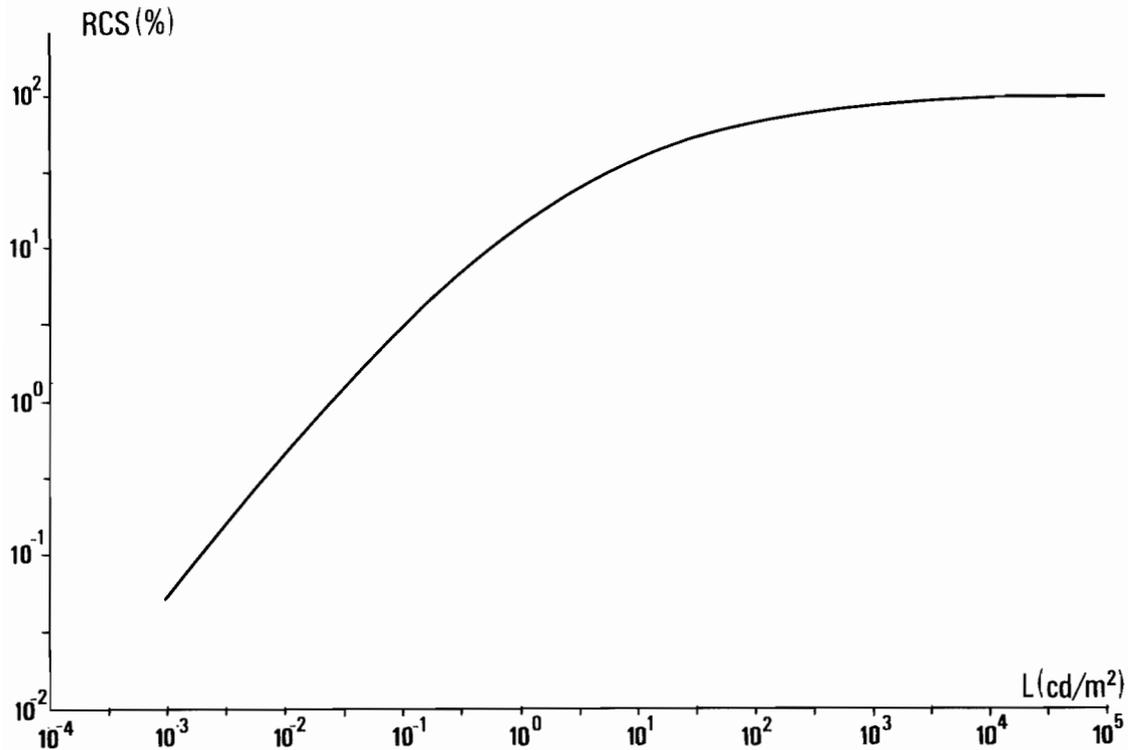


Fig. 58. – Courbe RCS standard en fonction de la luminance L (d'après Blackwell et Taylor).

1.5.2. Utilisation de l'équation fondamentale de visibilité

1.5.2.1. Rappel de l'équation

Comme exposé au § 1.2.6., deux "objets" (L_{R1} , C_{R1} , ε_1) et (L_{R2} , C_{R2} , ε_2) sont simultanément au seuil de visibilité si

$$\frac{\text{R.C.S.R.}(L_{R2})}{\text{R.C.S.R.}(L_{R1})} = \frac{C_{R1}}{C_{R2}} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^2$$

1.5.2.2. Utilisation pratique de l'équation

Afin de faciliter l'exploitation de cette relation, on recherche une équivalence de seuil de visibilité entre une situation effective (usager entrant dans un tunnel par exemple) et une situation de référence définie par des conditions de vision plus faciles à quantifier (route éclairée la nuit) (cf. § 1.4.1.1.).

Dans tout le § 1.4.1., nous avons calculé, à l'aide de l'équation fondamentale de visibilité, la luminance de chaussée assurant, en situation effective, les mêmes seuils de visibilité que la situation de référence. **Cela implique de ne modifier que la puissance de l'éclairage.**

En effet, changer de système d'éclairage revient à modifier la distribution du flux lumineux et par conséquent la relation entre la luminance d'un éventuel obstacle à percevoir et celle de la chaussée. Il devient alors impossible d'établir, par une seule variation de niveau, une équivalence de seuil de visibilité pour tous les "objets".

Cet argument est très important car il explique la difficulté à comparer des systèmes d'éclairage différents du point de vue de la visibilité, la comparaison devant obligatoirement faire intervenir une classe d'objets physiques choisie à l'avance.

Déterminer une situation de référence par le seul niveau L_{ref} (V_{ref}) n'est donc possible qu'une fois le système d'éclairage choisi.

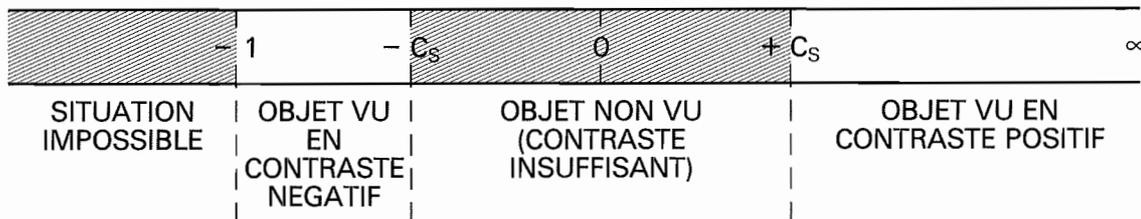
Nous comparerons par conséquent les différents systèmes en faisant intervenir des objets à voir impérativement dans le tunnel.

1.5.3. Quel système pour une vision d'un maximum d'objets ?

1.5.3.1. Comment ramener le problème du contraste aux objets :

Selon une approche similaire à celle de VALIN dans son article "Influence de la luminance moyenne des chaussées en éclairage public sur la perception des obstacles... et sur la sécurité" (13), on peut figurer sur un schéma les situations possibles pour un objet situé sur la chaussée.

Comme on l'a vu précédemment, les conditions de l'expérience donnée (taille de l'objet à percevoir, temps de présentation...) et la fixation d'un niveau de luminance entraînent l'existence d'un contraste de seuil C_S tel que $|C| \geq C_S \Leftrightarrow$ objet vu, soit :



En prenant comme obstacle une surface verticale (sans doute représentative de la moyenne des obstacles réellement rencontrés) suivant la loi de LAMBERT, on peut écrire :

$$L_o = \frac{\rho E_v}{n} \text{ avec } \rho = \text{facteur de réflexion de l'objet}$$

et E_v = éclairage vertical arrivant sur l'objet

$$\text{le contraste } C = \frac{L_o - L}{L} \text{ devient :}$$

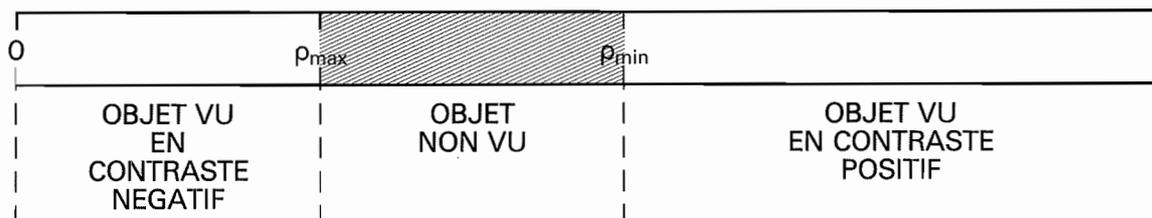
$$C = \frac{\rho E_v}{n L} - 1$$

L'objet déterminé par l'expérience est non vu si :

$$|C| < C_S \text{ c'est-à-dire si } \frac{n L}{E_v} (1 - C_S) < \rho < \frac{n L}{E_v} (1 + C_S)$$

avec évidemment la condition ρ appartient à l'intervalle $[0,1]$.

On en déduit que, **une fois le type d'éclairage choisi** (et en particulier le rapport $\frac{L}{E_v}$), la fixation de la luminance de chaussée L , de la taille et du temps de présentation de l'objet à percevoir, entraîne l'existence de deux valeurs ρ_{min} et ρ_{max} que l'on peut représenter de la manière suivante :



- $\rho_{\min} = \frac{n L}{E_v} (1 + C_S)$ est la valeur minimale pour que l'objet soit vu en contraste positif.
- $\rho_{\max} = \frac{n L}{E_v} (1 - C_S)$ est la valeur maximale pour que l'objet soit vu en contraste négatif.

Ceci représente le cas le plus général ; nous allons étudier l'influence du système d'éclairage sur les valeurs de ρ_{\min} et ρ_{\max} .

1.5.3.2. Que se passe-t-il en éclairage classique ?

Nous appelons ici éclairage classique l'application aux tunnels routiers des principes de l'éclairage public : distribution du flux lumineux la plus uniforme possible afin d'obtenir une luminance suffisamment élevée en tout point de la chaussée.

Ceci permet d'assurer un bon guidage de l'utilisateur et de créer une ambiance sécurisante mais qu'en est-il sur le plan de la visibilité d'éventuels obstacles ?

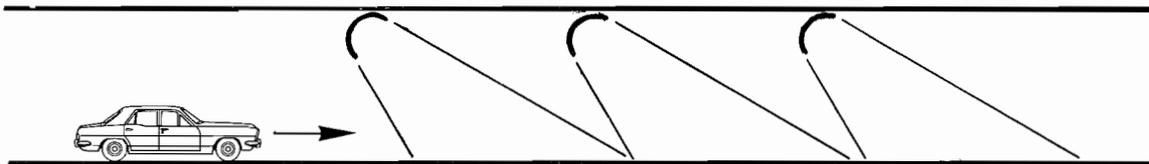
D'après l'allure de la R.C.S., on voit qu'aux niveaux couramment installés en éclairage public (de 0,5 à 2 cd/m²), une augmentation de luminance entraîne une diminution sensible du contraste de seuil et donc permet d'améliorer la visibilité de façon très nette (ce qui n'est plus vrai aux niveaux installés dans les zones de renforcements d'entrées de tunnels). Cependant le gros inconvénient est que ce système "ne choisit pas" entre les contrastes positifs ou négatifs et de nombreux objets se retrouvent à contraste quasiment nul sur la chaussée.

1.5.3.3. Comment utiliser mieux le contraste pour la vision des obstacles ?

Pour éviter la possibilité d'avoir à la fois des contrastes positifs, des contrastes négatifs... et de nombreux objets non vus entre les deux, deux choix opposés sont possibles.

a) Choix d'une chaussée sombre avec éclairage dirigé dans le sens des véhicules.

Le système est schématisé ci-dessous :

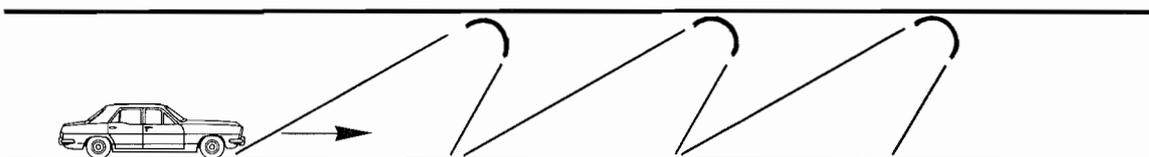


On augmente sensiblement l'éclairage vertical sur les obstacles et on diminue la luminance de chaussée. Ceci a pour effet de faire tendre vers zéro ρ_{\max} et dans un degré moindre ρ_{\min} :



Dès que ρ_{\max} s'annule, le contraste négatif devient impossible et donc tous les objets visibles le sont en contraste positif.

b) Choix d'une chaussée claire avec éclairage à contresens des véhicules.



On diminue sensiblement l'éclairage vertical sur les obstacles et on augmente la luminance de chaussée. On fait tendre vers 1 ρ_{\min} et dans un degré moindre ρ_{\max} .



Dès que ρ_{\min} est égal à 1, le contraste positif devient impossible.

c) Comparaison de ces deux systèmes à distribution de flux fortement asymétrique

Le premier intérêt commun de ces deux systèmes est qu'ils permettent assez facilement de n'avoir des visions d'obstacles possibles qu'en contraste positif pour le premier et négatif pour le second.

Cependant, ces deux politiques étant contradictoires, le choix de l'une ou de l'autre (ou l'abandon des deux au bénéfice du système classique) doit être fait après avoir défini les avantages et inconvénients de chaque système.

D'après ce que nous avons exposé précédemment, il est nécessaire de faire intervenir la classe des objets qui doivent être vus par le conducteur dans des conditions données. L'ensemble des obstacles possibles est très vaste et la répartition de leurs facteurs de réflexion aléatoire.

Dans ces conditions, comment choisir le "meilleur éclairage" c'est-à-dire celui qui permet de voir le maximum d'obstacles? On doit, à ce stade, faire intervenir des objets prioritaires. Evidemment, les véhicules eux-mêmes présents dans un tunnel représentent dans la majorité des cas les obstacles à éviter. Ce sont cependant des cibles de diamètre apparent élevé, les principaux problèmes de leur détection étant la dimension du fond sur lequel ils se détachent (souvent la chaussée n'est qu'une faible partie de ce fond et les piédroits du tunnel, ou la sortie pour les ouvrages courts, jouent un rôle prépondérant) et l'aspect dynamique du phénomène (ces cibles ne sont pas en général à l'arrêt et des grandes différences de vitesses peuvent être causes d'accidents).

Par conséquent, moyennant certaines conditions, des critères de vision d'obstacles plus petits sont sécuritifs pour la détection des véhicules. On pense alors au piéton ou au cycliste présent dans le tunnel. Il ne faut pas oublier que même dans les ouvrages où piétons et cyclistes sont interdits, un conducteur dont le véhicule a une avarie peut être contraint ou tenté de sortir de celui-ci.

Si l'on prend le critère "voir suffisamment tôt un piéton pour s'arrêter sans dommage pour lui", on étudie un domaine beaucoup plus restreint que celui de la visibilité en général mais aussi permettant d'aboutir à des résultats plus concrets et donc exploitables.

Dans son article (13), VALIN cite des études (14, 15) menées sur les facteurs de réflexion des piétons et montrant que 90% de ces derniers ont des vêtements dont le facteur de réflexion est inférieur à 0,2. On voit donc une tendance à des obstacles sombres.

Partant de ce résultat, pour voir un maximum de piétons, il faut concevoir un éclairage favorisant le contraste négatif (effet silhouette).

D'autre part, en plein jour, l'usager est adapté à des luminances très fortes de l'ordre du millier à plusieurs milliers de candélas par mètre carré. Le passage à l'ambiance sombre de l'intérieur du tunnel est une épreuve pour sa vision. Rechercher une luminance de chaussée très sombre accentue le phénomène de défaut d'adaptation temporelle et semble assez néfaste sur le plan psychologique : même si le choix d'une chaussée sombre avec éclairage dans le sens de la circulation permet de voir beaucoup mieux certains obstacles par une grande amélioration de leur contraste, l'entrée du tunnel sera perçue depuis l'extérieur comme un trou noir. Le défaut d'adaptation spatiale peut être mieux traité (pour les obstacles clairs) que dans le cas de l'éclairage classique mais l'impression de danger créée par ce "trou" bien moins éclairé sera la plus forte chez les usagers.

On voit que la solution de la chaussée sombre présente de nombreux inconvénients à l'entrée du tunnel. C'est donc le système opposé qui doit être étudié.

d) Choix du système à mobilisation de contraste

On peut décrire brièvement le système ainsi : des luminaires éclairent la chaussée de façon dissymétrique à contresens de la circulation. Toutes précautions doivent être prises pour ne pas éblouir les usagers. La chaussée doit être claire et plutôt brillante de façon à augmenter la luminance pour un usager situé en amont.

En théorie, ce système peut être installé sur toute la longueur du tunnel, nous verrons qu'il a un grand intérêt dans les zones d'entrée mais beaucoup moins en section courante.

1.5.4. *Gain théorique possible*

Nous rappelons tout d'abord brièvement deux publications importantes dont l'étude a facilité l'approche théorique du C.E.Tu.

1.5.4.1. *Les travaux de BLASER (16)*

Depuis plusieurs années, les spécialistes pressentaient que l'application des systèmes à mobilisation de contraste devait permettre, aux entrées de tunnels, un gain sensible en énergie et en visibilité.

Quantifier ce gain semblait beaucoup plus difficile.

A l'inverse de la grande majorité des pays, la Suisse n'a pas attendu de théorie solide et a développé ces systèmes. Ce soutien théorique existe maintenant grâce à BLASER qui a fait un travail de pionnier en la matière (16).

En résumé très rapide, les options fondamentales prises et les résultats obtenus par BLASER sont les suivants :

– Il se base sur les travaux de SCHREUDER (17) donnant la luminance de chaussée nécessaire en entrée du tunnel.

– Il introduit la relation $C = \frac{\rho E_v}{\pi L} - 1$ et montre l'importance du rapport $\frac{L}{E_v}$

qu'il nomme **paramètre de qualité de contraste**. Ce paramètre donne en effet une information sur la géométrie de distribution du flux lumineux (plus il augmente, plus le système est à contre-jour).

– L'exploitation du paramètre de qualité de contraste est la suivante :

En appelant L_1 la luminance d'adaptation et L_2 celle de la chaussée, il trace deux séries de courbes dont l'intérêt est fondamental et dont nous représentons des extraits en figures 59 et 60 : il s'agit de la représentation de

$\frac{L_2}{L_1}$ en fonction du facteur de réflexion ρ des objets à voir, $\frac{L_2}{E_v}$ servant de paramètre.

Il quantifie donc en quelque sorte les schémas donnés aux § 1.5.3.1. et 1.5.3.3. Un système classique peut être représenté par un paramètre de qualité de contraste de 0,10 à 0,25 et entraîne une grande plage d'objets non vus, dont la diminution peut être obtenue par l'augmentation de L_2 (fig. 59). On remarque que même une forte croissance de L_2 ne donne qu'une faible diminution de l'intervalle $[\rho_{max}, \rho_{min}]$ et ceci en raison des phénomènes déjà évoqués au § 1.5.1. Un système asymétrique dont le paramètre de qualité de contraste est supérieur à 0,5 entraîne non seulement une diminution de $\frac{L_2}{L_1}$ très sensible, mais repousse les objets non vus de telle sorte que seul le contraste négatif est possible.

L'équation fondamentale rappelée au § 1.5.2.1. permet à partir de cette valeur et sans changer de système d'éclairage, de déterminer quelle variation de luminance de chaussée est nécessaire pour rester au seuil de visibilité lorsque des voiles parasites viennent troubler la vision.

Le problème de passer d'un système d'éclairage à un autre est différent. Nous l'abordons de la manière suivante :

A – Comme indiqué précédemment, les facteurs de réflexion des objets vus ou non vus se répartissent de la manière suivante en éclairage symétrique :



On peut calculer ρ_{min} et ρ_{max} connaissant la valeur de la luminance de chaussée.

B – En se référant à la courbe de distribution statistique des facteurs de réflexion des piétons rappelée par VALIN (13), on obtient le pourcentage des objets vus donné par les valeurs ρ_{min} et ρ_{max} .

C – En faisant changer la configuration de l'éclairage (c'est-à-dire en augmentant le rapport $\frac{L_{chaussée}}{E_{vertical}}$), on recherche quelle valeur de L chaussée permet de voir un pourcentage égal à celui calculé en B.

Etape A

La luminance de chaussée $L = 1 \text{ cd/m}^2$ sur laquelle doivent se détacher les objets est reliée au contraste de seuil de perception par :

$$C_s = \frac{K}{\text{R.C.S.} (L)}$$

d'après la publication C.I.E. n° 19 (3) C_s est le contraste de seuil, R.C.S. (L) est la R.C.S. standard de L et K est la constante de l'expérience tenant compte du temps de présentation et du diamètre apparent de la cible.

L'avantage d'utiliser la R.C.S. standard est sa formulation mathématique :

$$\text{R.C.S.} (L) = 100 \left[\left(\frac{1,675}{L} \right)^{0,4} + 1 \right]^{-2,5}$$

Toujours selon la publication C.I.E. n° 19 (3), l'expérience de Blackwell et Blackwell (18) avec un disque de 4' et un temps de présentation de 1/5 s permettant de tracer la "Standard Visibility Reference Function" (VL_1) a pour constante $K = 5,74$.

On constate en effet que les points expérimentaux obtenus par Blackwell et Blackwell coïncident très bien avec la courbe $C_s (L)$ lorsque

$$C_s = \frac{5,74}{\text{R.C.S.} (L)}$$

Pour l'étude du cas général de la visibilité des obstacles, nous gardons dans un premier temps le facteur K inconnu. Lorsque L est fixée, l'objet de luminance L_o est vu si son contraste

$$C = \frac{L_o - L}{L} \text{ est supérieur en valeur absolue à } C_s.$$

Comme on l'a vu au § 1.5.3.1. on peut écrire le contraste C sous la forme :

$$C = \frac{\rho E_v}{\pi L} - 1$$

et en déduire que les objets non vus sont tels que :

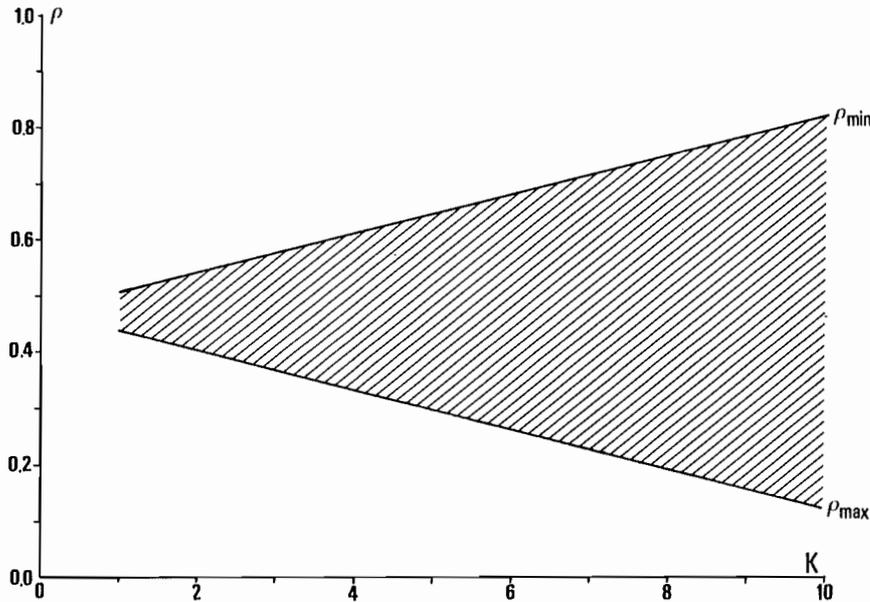


Fig. 61. – ρ_{\min} et ρ_{\max} fonctions de K caractérisant l'expérience de visibilité.

$$\frac{nL}{E_v} (1 - C_s) < \rho < \frac{nL}{E_v} (1 + C_s)$$

soit en remplaçant C_s par $\frac{K}{\text{R.C.S. (L)}}$:

Les objets non vus sont tels que :

$$\rho_{\max} = \frac{nL}{E_v} \left(1 - \frac{K}{\text{R.C.S. (L)}} \right) < \rho < \frac{nL}{E_v} \left(1 + \frac{K}{\text{R.C.S. (L)}} \right) = \rho_{\min}$$

On retrouve le rapport $\frac{L}{E_v} = P$ paramètre de qualité de contraste.

Nous sommes dans le cas d'un éclairage de type symétrique, $P = 0,15$ est une valeur représentative de ce système.

Pour évaluer l'influence de K (qui, rappelons-le, dépend de l' "expérience" considérée nous avons tracé sur un même diagramme $\rho_{\min}(K)$ et $\rho_{\max}(K)$. pour K variant de 1 à 10 (fig. 61).

On voit évidemment que plus K est grand, c'est-à-dire plus l'expérience est contraignante (cible plus petite par exemple) plus vaste est l'intervalle $[\rho_{\max}, \rho_{\min}]$ d'objets non vus.

La vision en contraste positif n'intervient, dans le cas le plus favorable où $K = 1$, que pour des facteurs de réflexion supérieurs à 0,5 environ. Nous allons voir dans l'étape B que cette remarque a une grande importance.

Nous obtenons ρ_{\min} et ρ_{\max} en fonction de K et nous pouvons passer à l'étape B.

Etape B

La distribution statistique des facteurs de réflexion des piétons donnée par VALIN (13) et dont l'allure est rappelée en figure 62 indique qu'ils sont quasiment tous inférieurs à 0,4.

En raison de ce que nous avons exposé précédemment et si l'on prend la vision des piétons comme tâche visuelle prépondérante, on remarque que le contraste positif est pratiquement inexistant en système d'éclairage symétrique.

Les objets dont ρ appartient à $[\rho_{\min}, 1]$ sont rarissimes.

Cette constatation nous permet de ne prendre en compte que les objets dont le facteur de réflexion appartient à $[0, \rho_{\max}]$.

Les groupes de travail de la C.I.E. (SC 3 du TC 4.6) et de l'A.I.P.C.R. (GT 3 du Comité Technique des Tunnels Routiers) ont défini comme obstacle minimum dangereux un cube de 20 cm d'arête.

Une valeur possible de K pourrait donc être déterminée par les mêmes conditions que l'expérience de Blackwell et Blackwell (18) mais avec un disque de 20 cm vu à 100 m soit 6' 53" (au lieu de 12 cm à 100 m soit 4' 08").

Si on appelle k la valeur de la constante de cette nouvelle "expérience", en appliquant la loi de RICCO $C \varepsilon^2 = \text{cste}$, on peut écrire :

$$\frac{K}{k} = \left(\frac{20}{12}\right)^2 \approx 2,78 \quad \text{soit} \quad k \approx \frac{5,74}{2,78} \approx 2,07$$

En résumé : la tâche visuelle de l'utilisateur devant voir en 0,2 seconde un disque de 20 cm de diamètre à 100 m en l'absence de tout voile parasite nous donne la relation :

$$C_{\text{seuil}} \approx \frac{2,07}{\text{R.C.S. (L)}}$$

Nous avons ainsi tous les éléments pour déterminer L'.

Voici trois applications numériques permettant de donner un ordre de grandeur des luminances de référence pour des systèmes à mobilisation de contraste.

– Système asymétrique : $P' = 0,5$

$$\begin{aligned} \text{R.C.S. (L')} &\approx 2,77 \\ \underline{L' \approx 9,2 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2} \end{aligned}$$

– Système à contre jour : $P' = 1$

$$\begin{aligned} \text{R.C.S. (L')} &\approx 2,37 \\ \underline{L' \approx 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2} \end{aligned}$$

– Système très fortement à contre jour : $P' = 2$

$$\begin{aligned} \text{R.C.S. (L')} &\approx 2,21 \\ \underline{L' \approx 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2} \end{aligned}$$

Les niveaux très faibles obtenus servent uniquement de base au calcul des luminances nécessaires en renforcement d'entrée.

Il n'est pas souhaitable de les mettre en œuvre en section courante pour de nombreuses raisons dont les principales sont l'éblouissement engendré qui ne serait plus négligeable comme à l'entrée devant les luminances de voiles extérieurs, l'adaptation temporelle et le confort des usagers.

1.5.4.4. Economie engendrée sur les renforcements d'entrée

Pour illustrer le gain possible nous utilisons des données réelles de voile de FRY (représenté en fig. 64), voile atmosphérique et de pare-brise (fig. 65) mesurées sur le site du tunnel du Pas du Mortier à la tête côté Autrans. La luminance atmosphérique est assez élevée (en raison de la présence d'une légère brume par grand soleil) mais celle de FRY est plutôt faible car le site est encaissé et les arbres d'un vert sombre sont très nombreux dans le champ de vision de l'automobiliste regardant le tunnel.

L'itinéraire est sinueux et il semble très difficile d'aborder l'ouvrage à des vitesses supérieures à 60 km/h ; cependant, afin d'illustrer l'intérêt des systèmes à mobilisation de contraste, nous avons tracé les courbes de luminance nécessaire sur les 300 premiers mètres du tunnel en fonction de deux vitesses d'approche différentes (80 km/h et 100 km/h) et des luminances de référence suivantes :

Fig. 67 et 69 : $0,07 \text{ cd/m}^2$ pour 80 km/h représentant le système asymétrique (ou à contre-jour).

Fig. 66 et 68 : – Courbe pleine : 1 cd/m^2 pour 80 km/h représentant le système de type symétrique.

– Courbe en pointillé : les courbes tracées respectivement en figure 67 et 69, dont la représentation ici montre de façon frappante le gain en luminance.

On peut faire, sur les premiers mètres de renforcement, la comparaison suivante :

– Pour l'utilisateur abordant le tunnel à 80 km/h, la prise en compte d'une luminance de référence $L_{ref} = 1 \text{ cd/m}^2$ entraîne un niveau de luminance égal à environ 7 fois celui nécessaire lorsque $L_{ref} = 0,07 \text{ cd/m}^2$.

– Pour l'utilisateur abordant le tunnel à 100 km/h, le rapport des luminances nécessaires est quasiment égal à 9.

Le gain permis par les systèmes à mobilisation de contraste dépend donc de la situation de l'entrée du tunnel mais croît lorsque les conditions se détériorent.

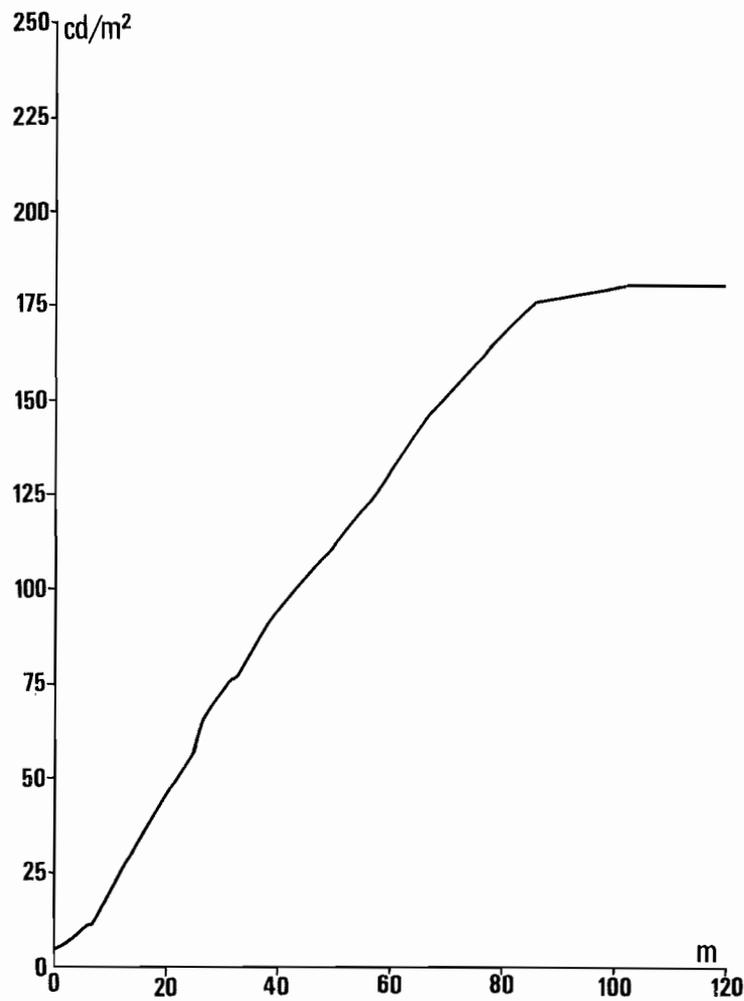


Fig. 64. – Relevé de luminance de voile de FRY effectué sur le site du Pas du Mortier.

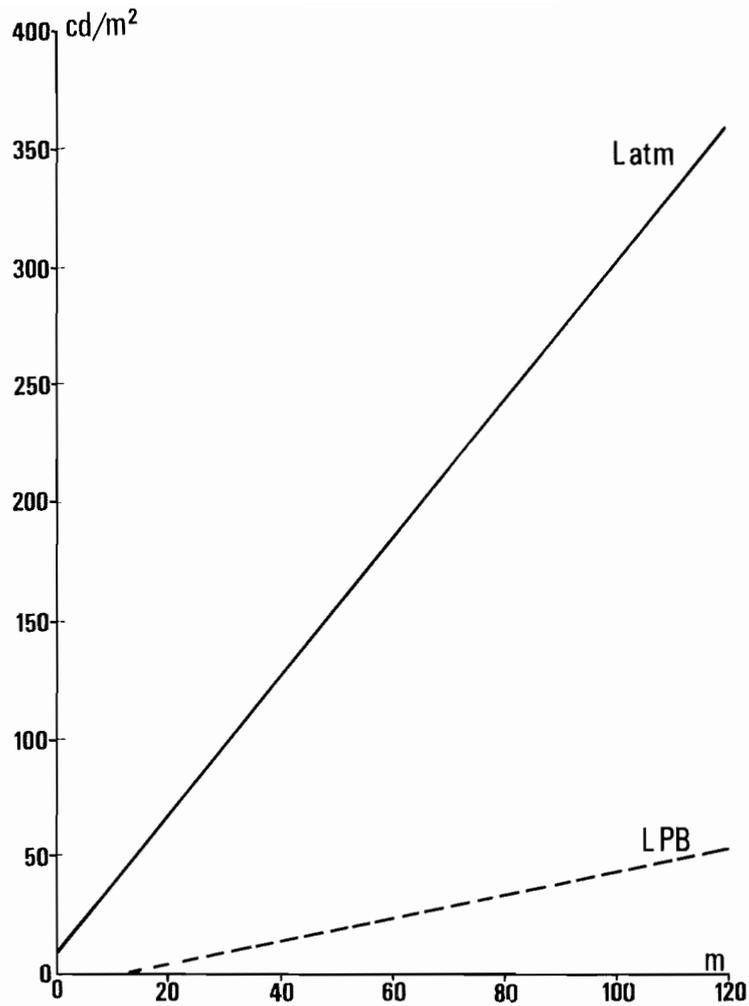


Fig. 65. – Relevés de luminances de voiles atmosphérique et de pare-brise effectués sur le site du Pas du Mortier.

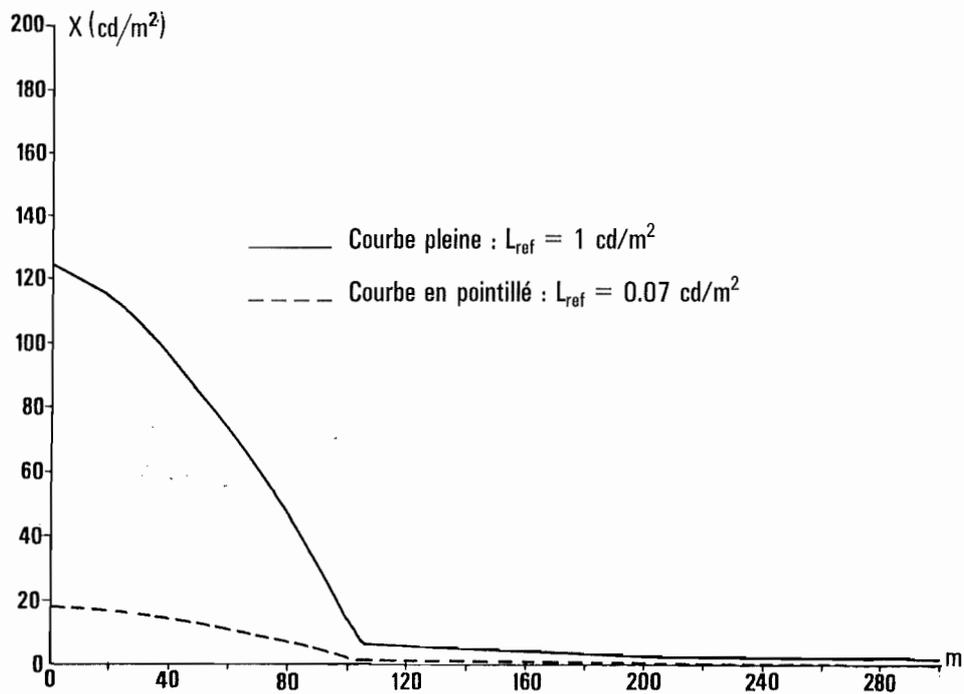


Fig. 66. – Luminance de chaussée nécessaire en tunnel en fonction des paramètres suivants :
 – $D_{ref} = D_{eff} = 105 \text{ m}$
 – Coefficient d'extinction : 0.001 m^{-1}
 – Facteur de réflexion de chaussée : 0.18.

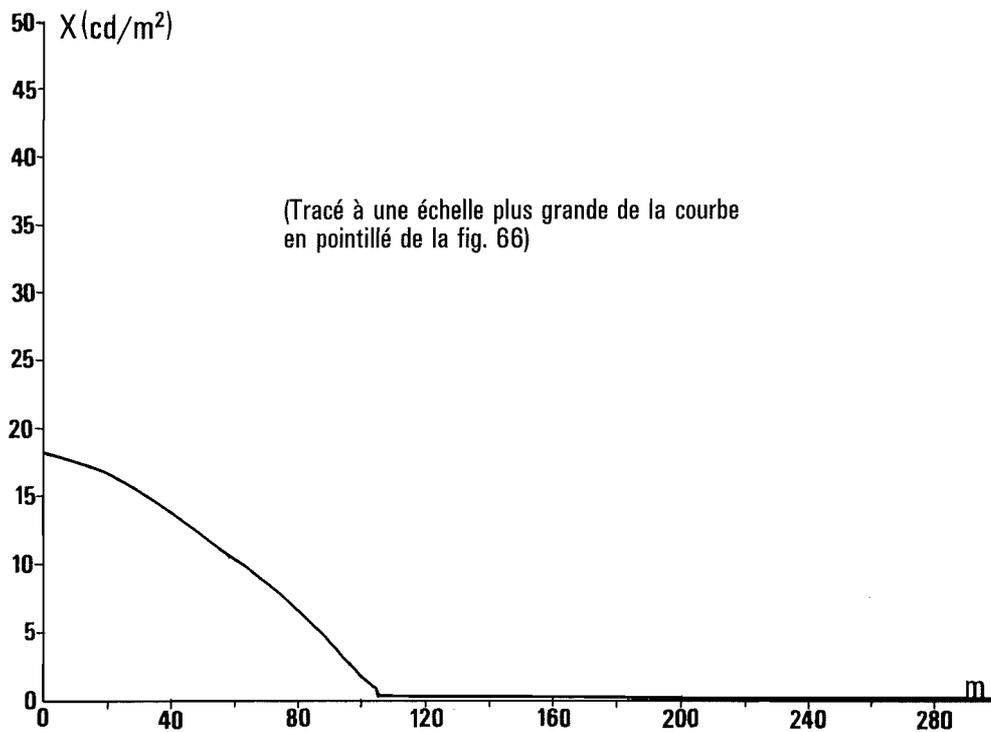


Fig. 67. — Luminance de chaussée nécessaire en tunnel en fonction des paramètres suivants :
 — $D_{ref} = D_{eff} = 105 \text{ m}$
 — Coefficient d'extinction : 0.001 m^{-1}
 — Facteur de réflexion de chaussée : 0.18
 — $L_{ref} = 0.07 \text{ cd/m}^2$

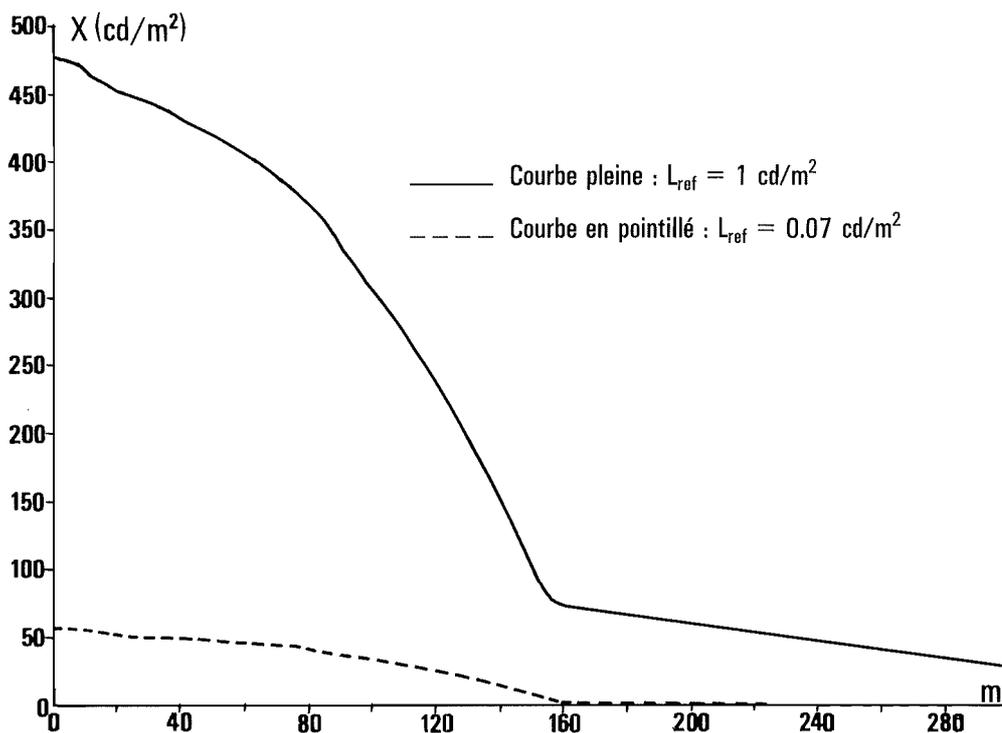


Fig. 68. — Luminance de chaussée nécessaire en tunnel en fonction des paramètres suivants :
 — $D_{ref} = 105 \text{ m}$
 — $D_{eff} = 160 \text{ m}$
 — Coefficient d'extinction : 0.001 m^{-1}
 — Facteur de réflexion de chaussée : 0.18

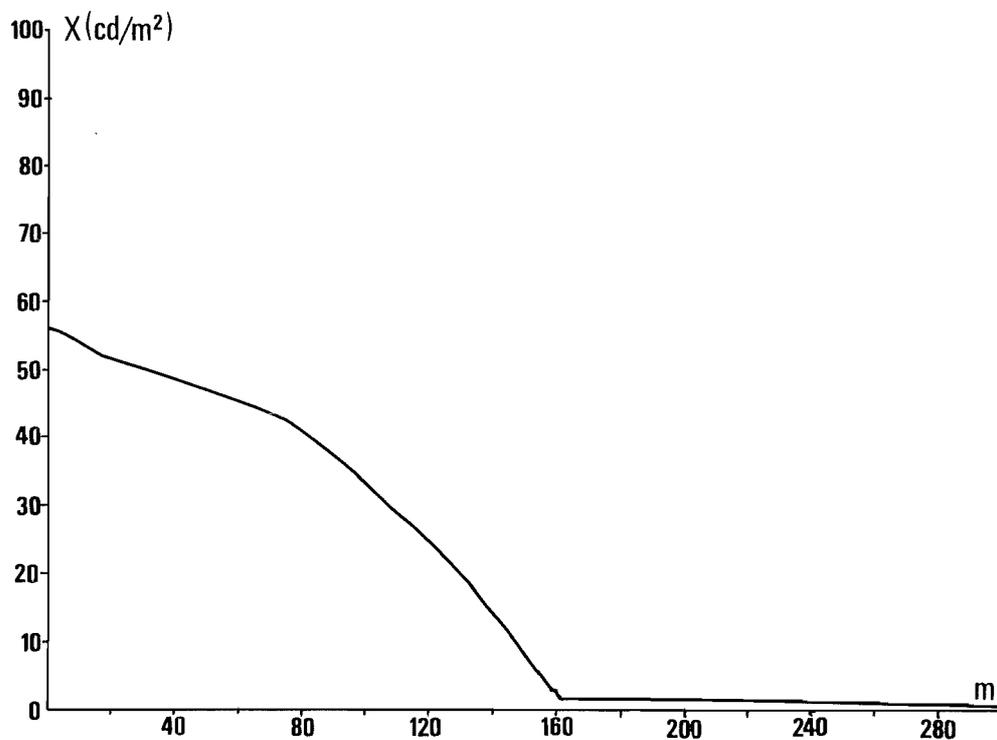


Fig. 69. – Tracé à une échelle plus grande de la courbe en pointillé de la figure 68.

1.5.4.5. Nécessité du système

L'exemple précédent (où l'on a pourtant affaire à des luminances de voiles non extrêmes) montre que seule l'utilisation des systèmes à mobilisation de contraste peut permettre de rendre accessibles des niveaux de luminance nécessaires pour les cas difficiles de vitesse d'approche élevée.

Cette influence de la vitesse via la distance d'arrêt est déjà importante en section courante : on peut citer les essais de DUBUISSON (19) au tunnel du Mont Blanc montrant que la réduction de la distance de visibilité de cubes de 20 cm d'arête était de l'ordre d'une dizaine de mètres lorsque l'éclairage de section courante passait du plein régime (2,3 cd/m² sur la chaussée) au régime moitié (1,1 cd/m²) pour un même observateur, une même hauteur d'objet et un même contraste. Les distances de visibilité mesurées alors étant de l'ordre de 50 à 100 m, on voit que le doublement de la puissance d'éclairage n'entraînait qu'un gain de 10 à 20% sur celles-ci.

L'influence du diamètre apparent devient énorme en renforcement d'entrée où la R.C.S. est très plate et où une forte variation relative de la luminance intrinsèque de chaussée correspond à une variation beaucoup plus faible de la luminance rétinienne, seule représentative de la vision de l'utilisateur.

Rappelons que la loi de RICCO-BLACKWELL n'est valable rigoureusement que pour un temps de présentation du test et de son environnement tendant vers l'infini. On calcule donc un minorant de la luminance nécessaire en appliquant cette loi.

Ce minorant varie tellement avec la vitesse que seuls les systèmes à mobilisation de contraste semblent à même de permettre un éclairage de renforcement basé sur la visibilité de petits obstacles, dans le cas de vitesses supérieures à 100 km/h.

1.5.5. Conclusion et suite à donner

Notre approche théorique montre des gains en luminance de l'ordre d'un facteur 10. Les gains en puissance seront à notre avis comparables car, outre le facteur 10 précédent, entrent en compte :

- Un facteur de 2 à 3 venant du fait que l'on utilise mieux la spécularité de la chaussée,
- Un facteur de 0,5 à 0,8 dû au fait qu'une installation à mobilisation de contraste possède un facteur d'utilisation a priori inférieur à celui d'une installation classique.

Nous avons vu que ce gain en puissance est d'un intérêt fondamental, au moins pour les tunnels autoroutiers qui nécessitent un éclairage correspondant à de grandes distances d'arrêt, a priori prohibitif par les méthodes classiques.

Au § 1.4.2., nous avons montré que pour les vitesses faibles, c'est le défaut temporel qui dimensionne l'éclairage nécessaire en système classique. Les systèmes à mobilisation de contraste ne présentent donc pas d'intérêt dans ce cas.

Cependant, le nombre de tunnels à vitesse autorisée élevée est important et par conséquent, constitue un champ d'application de ces systèmes économiques.

Cette recherche très récente a évidemment été diffusée largement à la profession et devrait déboucher progressivement sur une exploitation technique.

On conçoit aisément que ce type d'éclairage nécessite une étude ne dissociant pas les caractéristiques des appareils et celles de la chaussée, l'influence de la spécularité étant très grande. En particulier, il semble que les qualités principales demandées à la couche de roulement soient :

- une bonne spécularité à l'état sec ;
- une clarté suffisante ;
- une porosité importante pour éviter la constitution d'un film d'eau, véritable miroir à proscrire absolument.

Sur le plan pratique, il reste du chemin à parcourir avant l'utilisation courante des systèmes à mobilisation de contraste, mais compte tenu des possibilités entrevues, les obstacles devraient être normalement surmontés.

1.6. COMPARAISON AVEC LES AUTRES ERREMENTS

1.6.1. Principales théories existantes

Le problème de la vision d'un conducteur abordant un tunnel étant particulièrement complexe, la plupart des spécialistes ont effectué des simulations en laboratoire en recherchant la représentation la meilleure de la situation réelle.

De nombreuses simplifications ont été nécessaires. L'expérience type peut être résumée de la façon suivante :

On présente à un observateur un écran de dimensions assez grandes et de luminance uniforme élevée, au milieu duquel une "fenêtre" très petite de plus faible luminance apparaît.

A l'intérieur de cette fenêtre, une petite surface de contraste et de dimensions variables est présentée. On recherche la perception de ce test représentant un obstacle à l'intérieur d'un tunnel dans un environnement très lumineux simulant le paysage autour de la tête de l'ouvrage.

L'une des principales difficultés consiste donc à représenter le paysage réputé non homogène par un écran de luminance constante appelée généralement luminance d'adaptation des yeux du conducteur et notée L_a .

Tous les spécialistes sont à l'heure actuelle, à peu de chose près, d'accord sur les valeurs pratiques de L_a , mais pas sur leur utilisation.

En effet, pour un même paysage, donc à luminance d'adaptation égale, on peut trouver autant de niveaux de luminance de chaussée nécessaire en tunnel que d'hypothèses (obstacle + conditions de vision de l'obstacle) différentes.

Les éléments prépondérants dans les simulations sont :

- la dimension de l'obstacle ;
- son contraste intrinsèque sur la chaussée ;
- les temps de présentation de la "fenêtre" représentant le tunnel et de l'objet.

1.6.1.1. *Recommandations C.I.E.*

Un sous-comité technique de la C.I.E. (SC3 du TC 4.6) était chargé, jusqu'à la session d'Amsterdam en 1983, d'étudier les problèmes concernant l'éclairage des tunnels routiers. Ses travaux ont abouti à un rapport technique devant servir de base à de futures recommandations (11).

Faisant la synthèse de plusieurs expériences de Schreuder (17) et Narisada (20, 21, 22), ce dernier rapport donne les valeurs suivantes :

La perception en 0,1 seconde d'un objet de 20 cm à 100 m avec un contraste minimum de 20% nécessite une luminance de chaussée du tunnel L_2 égale à 12,5% de L_a .

Le même objet à percevoir en 0,2 seconde nécessite $L_2 \geq L_a/10$.

Les valeurs maximales de L_a étant de 8000 cd/m² environ, cela entraîne une luminance de chaussée en zone d'entrée de tunnel de 800 à 1000 cd/m².

Toujours d'après ce rapport technique de la C.I.E. (11), le défaut d'adaptation temporelle n'intervient que lorsque l'usager est à une dizaine de mètres de l'entrée de l'ouvrage.

Ces recommandations basées essentiellement sur des simulations sont forcément imparfaites, ce qui explique la poursuite des travaux prévue pour le prochain quadriennium.

En effet, dans les simulations retenues, le temps de présentation du trou noir représentant le tunnel est choisi volontairement très court : ce point particulier est loin de recevoir un accord unanime des spécialistes.

D'autre part, ce rapport conseille aux projeteurs de tenir compte de la vitesse des usagers, de la densité du trafic... mais sans quantifier l'importance de ces paramètres.

L'influence de la vitesse via la distance d'arrêt est en particulier peu étudiée. Cette question doit d'ailleurs être l'une des principales à traiter dans un très proche avenir.

Enfin, le cas des tunnels courts n'est que très peu évoqué alors que notre méthode s'y applique de la même manière que pour les tunnels longs (le § 1.8. de ce guide leur est consacré).

Tous ces sujets doivent être traités par le Comité Technique "éclairage des tunnels" de la division 4, chargé d'élaborer les nouvelles recommandations de la C.I.E.

1.6.1.2. *Recommandations de l'AIPCR (23)*

Le Comité Technique des tunnels routiers de l'AIPCR avait fixé l'éclairage des tunnels courts comme thème de réflexion du sous groupe éclairage des tunnels, lors du dernier quadriennium.

Les tunnels courts sont en effet bien plus nombreux que les tunnels longs et leur cas n'avait jamais été traité de manière extensive. La méthode C.E.Tu., décrite dans ce guide, étant alors la seule à même de traiter le cas des tunnels courts (d'ailleurs de façon exactement identique à celle des tunnels longs), les actuelles recommandations de l'AIPCR se sont naturellement appuyées sur les recherches et les résultats obtenus au Centre d'Etudes des Tunnels.

On ne peut donc donner de règle simple permettant l'évaluation de la luminance de chaussée en tunnel en fonction de la luminance d'adaptation L_a . Pour des vitesses d'approche faibles, les niveaux recommandés sont très inférieurs à ceux préconisés par la C.I.E. Cette tendance s'inverse pour les vitesses très élevées (supérieures à 100 km/h).

1.6.2. *Avantages de la méthode C.E.Tu.*

Par rapport aux expériences en laboratoires nécessairement figées, nos essais in situ permettent de prendre en compte des variations de tailles de test et donc l'influence de la distance d'arrêt sur la vision des obstacles. Ceci constitue le plus grand progrès apporté par notre méthodologie. On imagine en effet le labeur ardu que représenterait une expérience statique étudiant la variation du paysage et celle de la taille du test pour un usager abordant un tunnel à des vitesses différentes. La mesure des luminances de voile et l'application de la loi de RICCO rendent aisée cette opération. En raison même de son originalité, notre méthode n'est pas directement comparable aux autres existant actuellement. Une divergence importante entre les dernières recommandations C.I.E, et nos résultats concerne l'influence de la taille de l'obstacle à percevoir. Elle ne pourra être levée qu'après des expériences complémentaires.

1.7. *ECLAIRAGE DE NUIT*

1.7.1. *Conditions de vision nocturne*

L'usager circulant de nuit reçoit, à l'air libre et même sur une chaussée éclairée, beaucoup moins d'informations que durant le jour. Il est adapté à des niveaux de luminance très bas (de l'ordre du candéla par mètre carré sur route éclairée). A l'approche d'un tunnel, les deux principaux défauts de vision diurne (adaptation temporelle et spatiale) disparaissent donc.

1.7.2. *Besoins en éclairage*

Dans ces conditions, l'ouvrage souterrain ne présente plus de difficultés pour le projecteur en éclairage.

On doit cependant éviter quelques écueils, surtout liés au confort des usagers :

– On ne doit pas éclairer trop intensément l'ouvrage car un éclairage puissant agressera inutilement l'œil de l'usager. Si l'itinéraire comprenant le tunnel est éclairé, un niveau égal ou légèrement supérieur peut être installé dans l'ouvrage. Si la chaussée d'accès n'est pas éclairée, une luminance de un à trois candélas par mètre carré est suffisante dans le tunnel.

– Il faut assurer une bonne uniformité de l'éclairage et préférer un plus grand nombre de sources à faible puissance à une extinction de foyers consécutifs.

1.8. *TUNNELS COURTS*

1.8.1. *Exposé du problème*

Ce thème est à l'étude depuis bien des années. La difficulté à trouver des solutions homogènes semble provenir essentiellement des faits suivants :

– **En principe** d'après ce que l'on a établi au § 1.4., il n'y a pas de problème nouveau du point de vue théorique, la valeur du voile de FRY dépendant du paysage, quel qu'il soit. (L_F sera par exemple plus grand pour un tunnel court dont on voit la sortie, à cause de l'augmentation des surfaces éblouissantes qui en résulte).

– **En pratique**, un éclairage calculé suivant la méthode du § 1.4., pour un tunnel dont la longueur avoisine 100 m, aboutit à un rapport coût d'éclairage/coût total de l'ouvrage jugé le plus souvent prohibitif. Cette seule remarque a conduit les spécialistes à rechercher des variantes de moindre coût et donnant une sécurité suffisante à l'usager.

La première idée est de réduire la puissance de l'éclairage, voire de supprimer celui-ci en faisant intervenir des phénomènes de vision n'existant pas dans les tunnels longs (en particulier l'effet silhouette d'objets se détachant sur la sortie depuis la zone d'approche), ou en modifiant la tâche visuelle du conducteur.

Si l'éclairage de l'entrée d'un tunnel long varie assez peu en fonction de sa géométrie, l'effet silhouette sans éclairage artificiel est par contre étroitement lié à la géométrie des tunnels courts. On voit donc qu'interviennent dans le choix des solutions d'éclairage des tunnels courts des facteurs complémentaires.

Même si l'on est en présence d'un tunnel court parfaitement rectiligne dont la sortie est visible depuis l'amont de l'ouvrage, il se produit un effet de cadre noir plus ou moins important suivant la longueur de l'ouvrage. Certaines catégories d'utilisateurs peuvent alors ne pas être vues en silhouette en raison de leur proximité des parois latérales (piétons, cyclistes), ou de leur trop faible hauteur s'ils sont sur la chaussée.

La géométrie du tunnel est donc essentielle si l'on veut faire intervenir l'effet silhouette sans éclairage artificiel. Mais avant tout, se pose la question de la tâche visuelle jugée suffisante pour un usager abordant un tunnel court.

Il semble qu'il y ait encore actuellement trois approches du problème :

1 – Il suffit que l'utilisateur soit guidé, aucun obstacle éventuel n'étant éclairé (le § 1.8.3. est consacré aux systèmes assurant le guidage de l'utilisateur).

2 – Il suffit de voir par effet silhouette, sans éclairage artificiel, les véhicules présents dans le "cadre blanc" visible depuis l'amont du tunnel. On admet alors la présence d'obstacles non visibles pour les raisons déjà mentionnées, ou on prolonge l'efficacité de l'effet par un éclairage approprié.

3 – On éclaire suivant les mêmes exigences que pour l'éclairage d'un tunnel long, c'est-à-dire dans la plupart des cas pour voir l'obstacle type 20 x 20 cm² ou encore pour obtenir un seuil de visibilité équivalent à celui apporté par un L_{ref} (V_{ref}) (**très rarement réalisé**).

On peut évidemment trouver des solutions intermédiaires mais ces trois catégories semblent regrouper tout ce qui se fait en matière d'éclairage de tunnels courts. Même lorsqu'on a défini une tâche visuelle, il reste à résoudre les questions d'ordre pratique :

– Comment réaliser l'éclairage nécessaire à la tâche visuelle jugée suffisante ?

Si l'on choisit l'effet silhouette engendré par la vision de la sortie, on peut penser définir les limites du système et donc celles distinguant le tunnel court du tunnel long au sens de l'éclairage. En fait, le problème est plus complexe car il faut encore définir quelles silhouettes doivent être vues et, comme il sera montré plus loin, on peut essayer de prolonger l'effet silhouette "naturel".

On voit donc qu'il est nécessaire de descendre dans le détail pour répondre aux questions qui se posent.

1.8.2. *Critères de choix et niveau de l'éclairage diurne des tunnels courts*

1.8.2.1. *Critères d'adoption d'un système d'éclairage diurne*

Les facteurs suivants sont à prendre en considération :

Facteurs qui influent sur l'état d'adaptation de la vision du conducteur

La notion d'éblouissement a été expliquée au § 1.2. ci-avant.

Plus le voile de FRY sera fort, plus le conducteur sera ébloui et plus un éclairage diurne sera nécessaire. Le défaut d'adaptation spatiale sera d'autant plus fort que le soleil levant ou couchant pourra se trouver proche de la direction d'observation du conducteur, que le ciel occupera une grande part du champ visuel, que le paysage entourant le trou noir sera clair (neige par exemple).

Il sera d'autant plus faible que le paysage entourant l'entrée du tunnel sera sombre, d'une façon naturelle (roche) ou artificielle (plantation...) et que la chaussée extérieure sera sombre.

Comme on l'a vu au § 1.2., tous ces effets qualitatifs sont intégrés quantitativement dans la seule mesure du voile de FRY, les valeurs obtenues pour ce paramètre constituant l'un des critères majeurs permettant de juger de la nécessité d'un éclairage.

Facteurs qui influent sur la mise à profit de la lumière du jour

– Caractéristiques géométriques du tunnel.

Selon la longueur et les courbures de l'ouvrage, on verra une partie plus ou moins importante de la sortie depuis l'amont du tunnel. Les techniques utilisant l'effet silhouette sont moins coûteuses qu'un éclairage classique. On a donc intérêt, dès le projet de génie civil, à choisir les variantes les plus favorables. Evidemment, le poids de l'éclairage est souvent faible par rapport à celui du génie civil. Mais plus le tunnel est court, plus ce poids prend de l'importance. Il n'est donc jamais inutile de le prendre en compte très tôt dans le projet.

Si on ne voit pas la sortie depuis l'amont du tunnel, il faut absolument prévoir un éclairage diurne.

Pour les tunnels présentant un "cadre noir" trop grand, c'est-à-dire pouvant cacher un obstacle potentiellement dangereux, on devra aussi concevoir un éclairage diurne basé sur les mêmes principes que l'éclairage des tunnels longs.

Autres facteurs à prendre en compte au stade du projet

- **Trafic :**

Sans pouvoir donner de règle précise, les besoins en éclairage, pour des raisons de sécurité et de confort, croissent avec la densité de circulation, tout au moins tant que celle-ci est compatible avec des vitesses élevées.

- **Pourcentage de poids lourds :**

Un trafic comportant un nombre élevé de poids lourds peut influencer le choix d'un éclairage diurne, les accidents de ces véhicules étant particulièrement redoutables. D'autre part, les émissions de fumée augmentent le voile atmosphérique, donc diminuent sensiblement la visibilité.

- **Circulation bidirectionnelle :**

C'est un facteur aggravant les risques d'accidents. En effet, un obstacle purement matériel et peu important, vu tardivement par un conducteur, peut lui faire perdre, un court instant, le contrôle de son véhicule, avec de graves conséquences en circulation bidirectionnelle.

- **Vitesse**

Nous avons montré l'influence énorme de la vitesse sur la visibilité via la distance d'arrêt. Par conséquent, on ne saurait trop conseiller d'éclairer très fortement tous les ouvrages situés sur voies rapides (autoroutes). A contrario, une limitation de vitesse peut, très aisément, aboutir à un éclairage suffisamment économique pour être adoptée dans de nombreux cas.

- **Présence de cyclistes, de piétons ou stations bus ou taxi :**

C'est sans doute le facteur le plus pénalisant pour l'éclairage. Si on admet la présence de piétons ou de cyclistes dans un tunnel, on ne peut se permettre de baser la tâche visuelle de l'usager sur autre chose que la vision de ces piétons ou cyclistes éventuellement tombés sur la chaussée. Ceci revient à dimensionner l'éclairage comme dans le cas d'un tunnel long.

- L'opacité est un facteur qui peut devenir très important dans les tunnels longs. Pour les tunnels courts, elle est en général faible dans tout l'ouvrage.

1.8.2.2. Niveau d'éclairage diurne

Encore plus que pour les tunnels longs, ce problème est du ressort des spécialistes car la tentation d'effectuer des économies d'investissement et surtout d'exploitation ne doit pas être suivie au détriment de la sécurité des usagers. Tous les facteurs intervenant dans le choix d'un éclairage et rappelés ci-dessus, doivent être appréciés en fonction de chaque ouvrage et aucune recette simple ne peut être donnée.

Le plus souvent possible, on essaiera de dimensionner l'éclairage comme dans le cas d'un tunnel long.

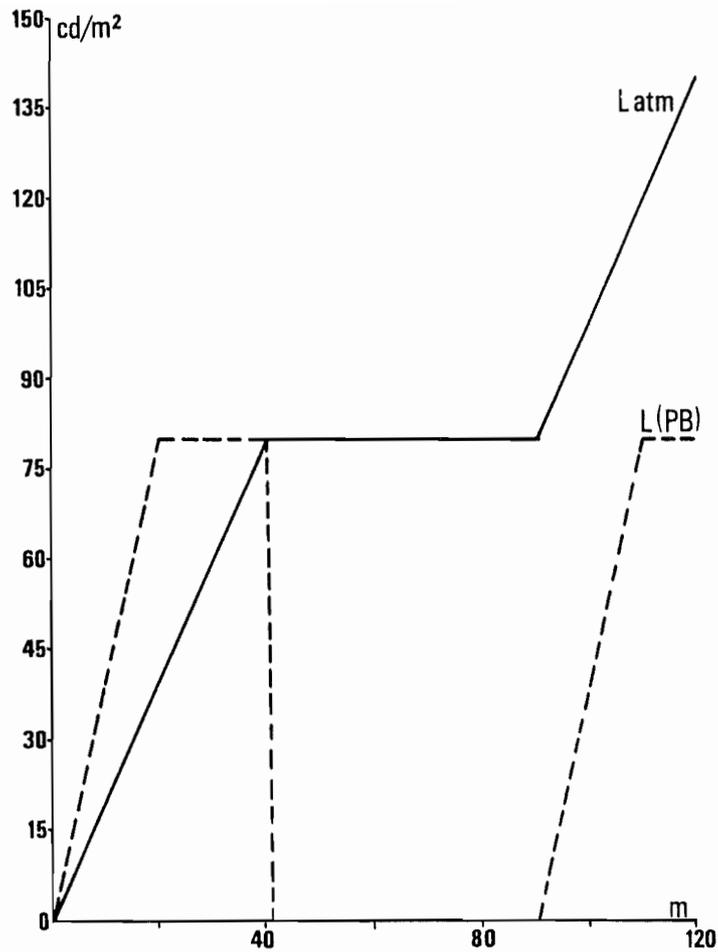


Fig. 71. – Voiles atmosphérique et de pare-brise.

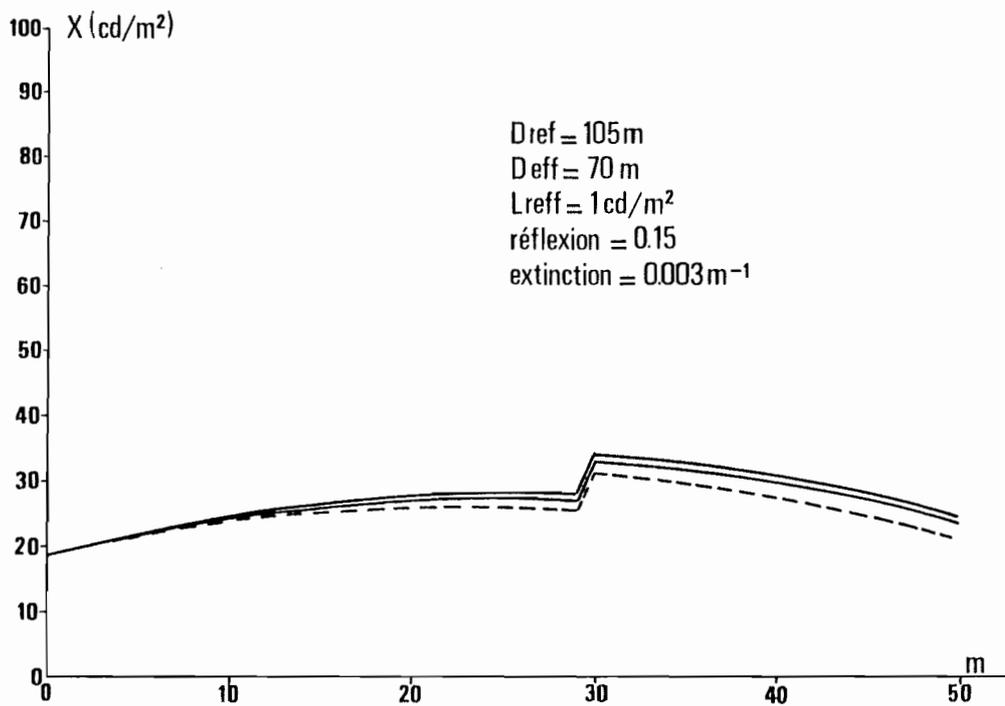


Fig. 72. – Luminance de chaussée satisfaisant l'adaptation spatiale.

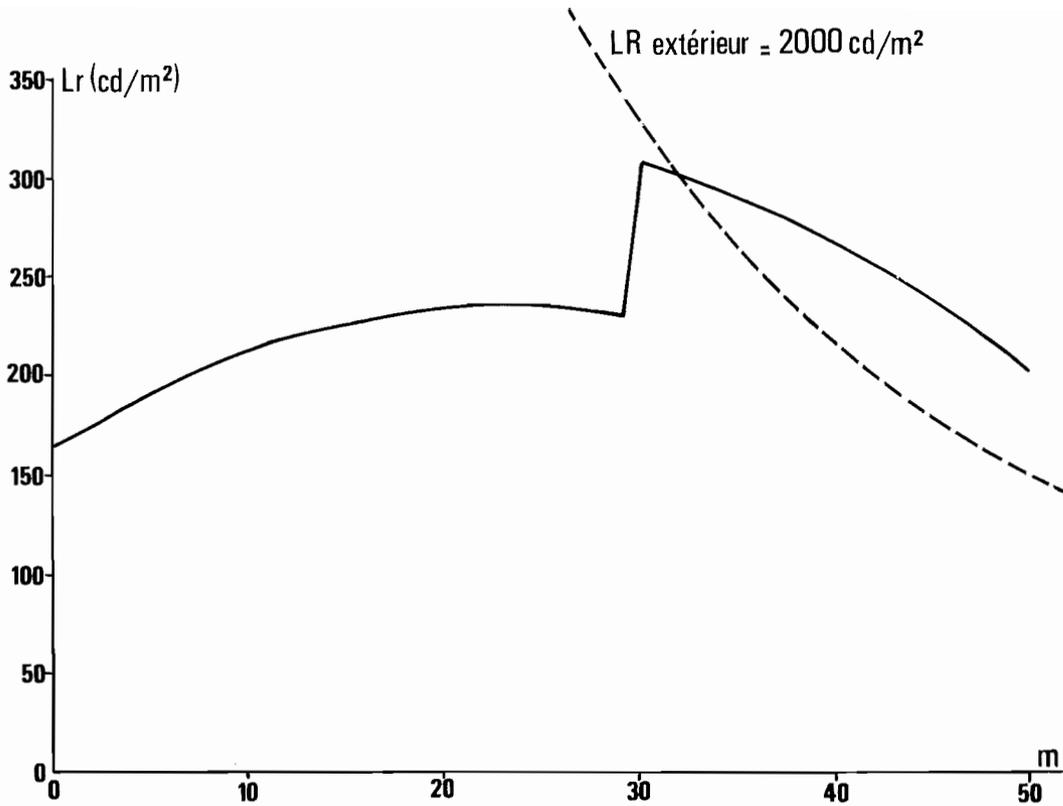


Fig. 73. – Luminance rétinienne résultante et courbe de décroissance maximale admissible pour l'adaptation temporelle.

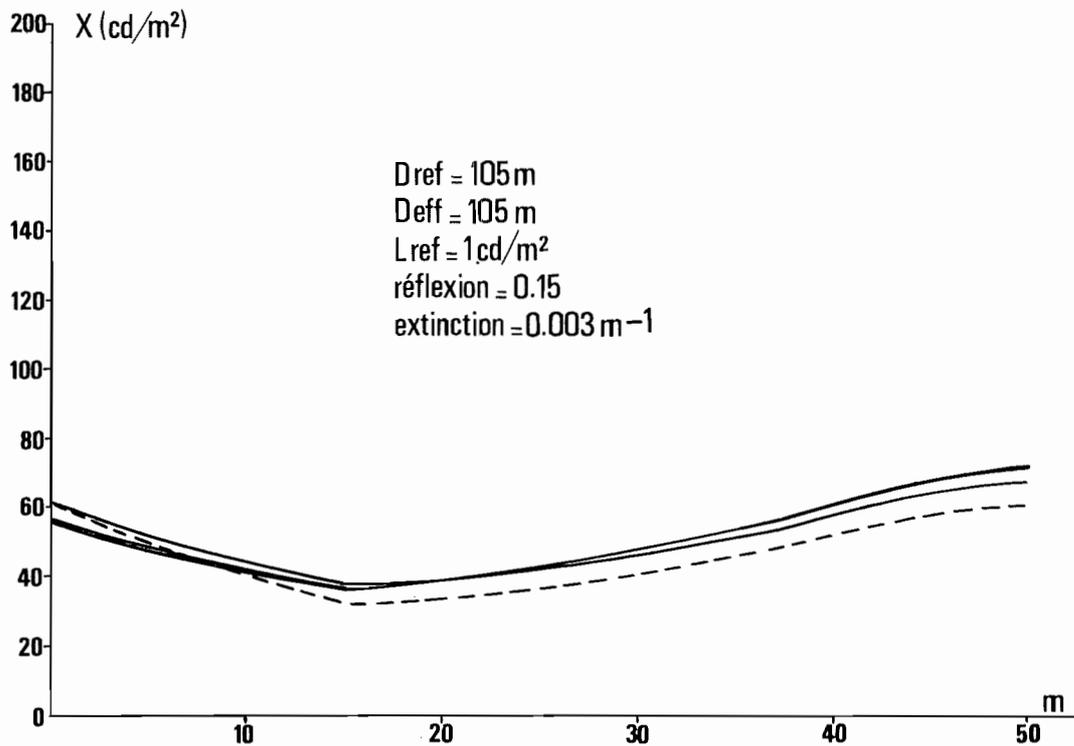


Fig. 74. – Idem fig. 72 avec $V_{eff} = 80 \text{ km/h}$.

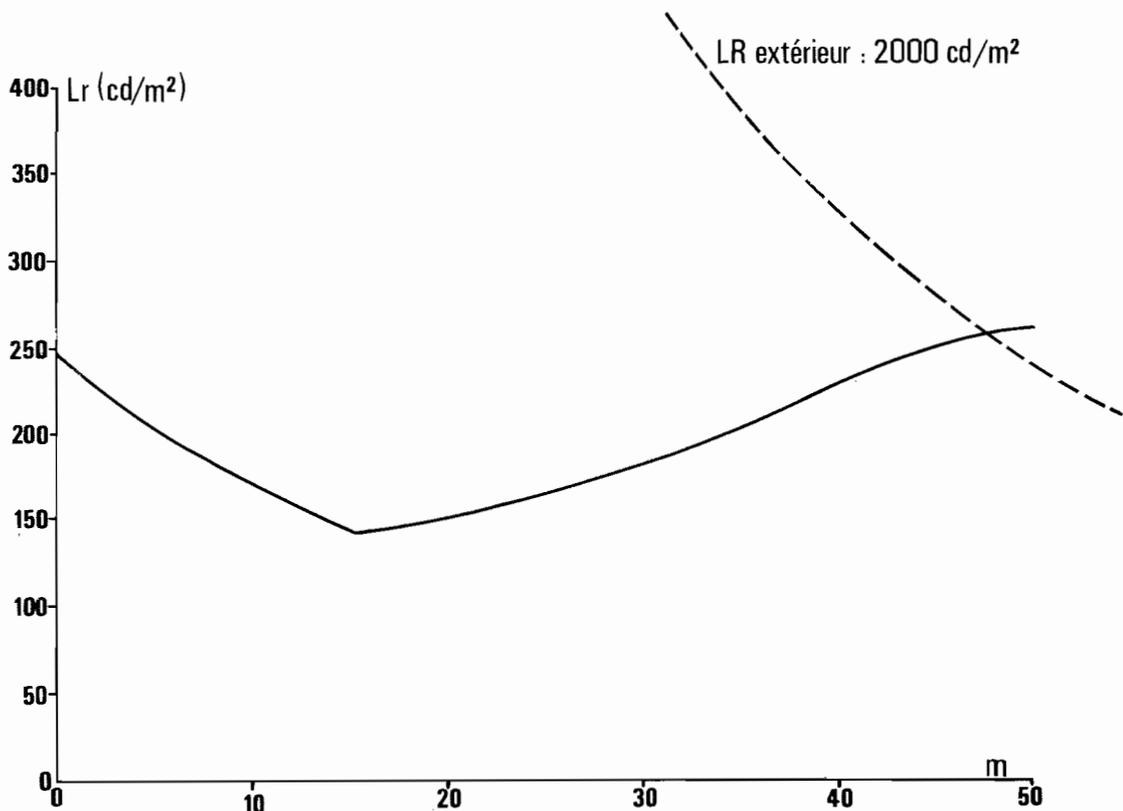


Fig. 75. – Idem fig. 73 avec $V_{eff} = 80$ km/h.

1.8.3. Systèmes assurant le guidage de l'utilisateur

Ces systèmes ont été étudiés par le Comité technique des tunnels routiers de l'A.I.P.C.R.(23).

En effet, certains tunnels ne peuvent, pour des raisons particulières (isolement...) recevoir une installation d'éclairage assurant la visibilité d'obstacles éventuels. Le but de ce paragraphe est de donner quelques conseils permettant de réaliser un guidage correct des usagers.

Cette solution est évidemment très économique mais on ne doit pas perdre de vue qu'une installation de guidage doit être sérieusement maintenue (en particulier nettoyée) car elle constitue le strict minimum nécessaire à la sécurité des usagers en tunnel.

Nous citons ci-dessous des extraits du rapport du Comité technique des tunnels routiers présenté au congrès A.I.P.C.R. de Sydney en octobre 1983 (23).

On peut réaliser un guidage des usagers de deux manières différentes :

- soit par un éclairage de balisage ;
- soit par un marquage réflectorisant.

1.8.3.1. Balisage réalisé par des appareils d'éclairage

On peut réaliser un bon guidage en plaçant sur les piédroits (ou le piédroit côté extérieur à la courbe s'il y en a une) à hauteur des yeux de l'utilisateur (vers 1,20 m au-dessus de la chaussée) une file d'appareils d'éclairage non éblouissante, de faible puissance et donc économique. Toutes précautions doivent être prises en cas de percussion des appareils par un usager, contre les risques de court-circuit...

On peut aussi éclairer les piédroits du tunnel de manière à bien délimiter le champ roulant pour l'utilisateur. N'étant pas basé sur une vision d'obstacle, cet éclairage n'a pas à être très puissant.

Un éclairage de la chaussée par des appareils très espacés risque de ne pas donner satisfaction (effet d'échelle, balisage non continu laissant dans l'ombre de trop grandes portions du tunnel), il est donc déconseillé.

1.8.3.2. Marquage réflectorisant des tunnels non éclairés

Une note a été publiée par le C.E.Tu. en 1982 (24) sur le marquage routier en tunnel. Nous rappelons ci-dessous l'essentiel sur ce sujet :

– La chaussée est divisée en voies de circulation au moyen de lignes blanches réflectorisées par l'emploi de billes de verre. On peut compléter le marquage par des plots rétro réfléchissants.

– Les bords de la chaussée doivent être délimités par une ligne blanche réflectorisée (complétée éventuellement de plots rétro réfléchissants). Ces lignes doivent être tracées aussi près que possible du bord de la chaussée.

a) Parois du tunnel

– Pour délimiter latéralement le champ visuel de l'utilisateur, on peut installer sur les parois du tunnel des réflecteurs à une hauteur de 1 m environ.

– Si des glissières de sécurité sont montées adjacentes aux parois du tunnel, elles peuvent être équipées de réflecteurs.

b) Signalisation

Il sera bon de prévoir une signalisation verticale avant l'ouvrage pour demander aux conducteurs d'allumer leurs feux de croisement et après la sortie du tunnel pour leur rappeler de les éteindre.

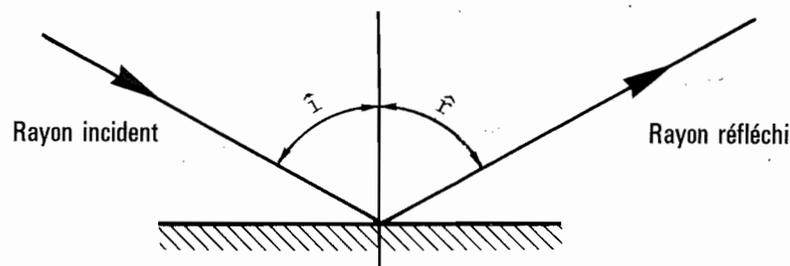
1.9. NIVEAUX D'ECLAIREMENT CORRESPONDANT AUX LUMINANCES

1.9.1. Les différentes réflexions possibles de la lumière

Nous avons rappelé que le paramètre important pour la vision est la luminance des surfaces regardées. Pour le projecteur cependant, il est indispensable de déterminer le flux lumineux correspondant, directement relié au nombre d'appareils et de sources lumineuses, et par conséquent au prix de l'investissement et de l'exploitation de l'installation. Il s'agit donc de déterminer le mieux possible les passages de la luminance nécessaire à l'éclairage requis, puis au flux et enfin au nombre et à l'emplacement des appareils d'éclairage.

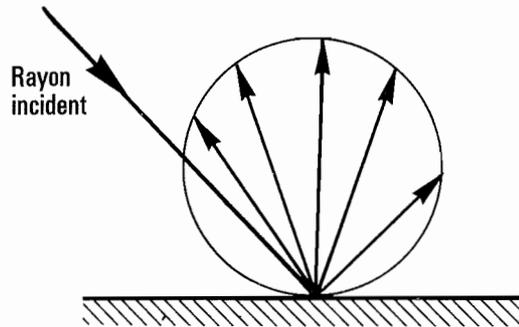
Cette démarche indispensable est difficile car elle fait intervenir les caractéristiques photométriques de la chaussée (voire des piédroits). Selon les matériaux retenus, leur mise en œuvre et leur usure, la réflexion des rayons lumineux peut varier énormément entre les deux limites suivantes :

1° La réflexion spéculaire



C'est le cas du miroir : tout rayon arrivant avec un angle d'incidence \hat{i} est réfléchi dans un plan contenant la normale à la surface au point d'arrivée du rayon incident et la direction d'incidence, l'angle de réflexion étant égal à celui d'incidence.

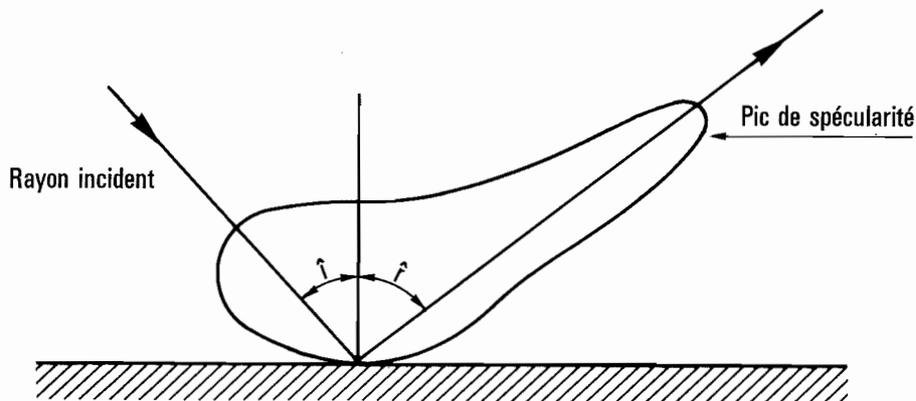
2° La réflexion diffuse orthotrope



La surface réfléchissante envoie les rayons réfléchis dans toutes les directions possibles et l'indicatrice des intensités est une sphère tangente à la surface au point d'incidence du rayon lumineux. Dans ce cas, la luminance de la surface est indépendante de la direction d'observation.

– La réflexion mixte

On ne rencontre pas dans la pratique de surface parfaitement diffusante ou à réflexion uniquement spéculaire. La réflexion de la lumière est un mélange de ces deux cas extrêmes, comme le montre le schéma suivant :



Les chaussées sont du type surface à réflexion mixte avec une specularité plus ou moins grande suivant les matériaux et le procédé de construction.

Même pour des revêtements présentant une réflexion diffuse à l'état neuf, l'usure entraîne une transformation de la surface qui devient de plus en plus spéculaire.

Parmi les études menées sur ce sujet, on peut citer le travail très complet de G. ACHARD (25) auquel nous conseillons le lecteur de se référer.

1.9.2. Approximation à la loi de LAMBERT

Une surface obéit à la loi de LAMBERT si sa luminance est constante quelle que soit la direction. Elle réfléchit donc la lumière de façon diffuse orthotrope. Nous avons dit que ce n'est jamais le cas des chaussées. Cependant, afin de simplifier les calculs reliant la luminance et l'éclairement, en toute première approximation, on applique la loi de LAMBERT qui donne :

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

- où
- L est la luminance de la surface
 - E est l'éclairement incident
 - ρ est le facteur de réflexion diffuse.

Cette approximation conduit donc à une relation d'une grande simplicité entre E et L mais on doit toujours avoir à l'esprit qu'elle peut, suivant les cas être entachée d'une erreur importante. En particulier, plus l'éclairage est dirigé de façon rasante à contre-sens de la circulation (cas des systèmes à mobilisation de contraste), plus l'utilisateur est situé près du pic de specularité. A ce moment, l'éclairage nécessaire à l'obtention de la luminance requise est donné par excès par la loi de LAMBERT, qui doit donc être manipulée avec précaution.

1.9.3. Intérêt des chaussées claires

Dans le cadre de l'approximation déjà mentionnée, l'intérêt est évident. En effet, les facteurs de réflexion diffuse peuvent varier de 0,11 environ pour une chaussée très noire (gussasphalt) à 0,24 (béton clair) soit un rapport de 2 directement répercuté sur la puissance à installer. On ne saurait donc trop recommander au responsable du projet de prendre en compte très tôt le bilan coût chaussée/coût éclairage tant en investissement qu'en exploitation de manière à rechercher un optimum économique.

1.9.4. Exemple : valeurs d'éclairage retenues en section courante

A partir des valeurs de luminance recommandées en section courante (§ 1.4.1.2.c) l'application de la loi de LAMBERT conduit aux éclairages récapitulés dans le tableau de la ligne 76.

Catégorie de tunnel	Luminance L_{sc} requise	Eclairages correspondants (en lux)		
		Chaussée très sombre $\rho = 0,12$	Chaussée bitumineuse éclaircie $\rho = 0,18$	Chaussée très claire $\rho = 0,24$
Tunnel de montagne	3 cd/m^2 à 5 cd/m^2	80 à 130	50 à 90	40 à 65
Tunnel de rase campagne	5 cd/m^2 à 10 cd/m^2	130 à 260	90 à 175	65 à 130
Tunnel urbain	10 cd/m^2 à 20 cd/m^2	260 à 520	175 à 350	130 à 260

Fig. 76. – Relation Luminance Éclairage en fonction du revêtement de Chaussée.

On voit donc toute l'incidence du choix du revêtement de chaussée sur le projet d'éclairage.

1.9.5. Exemples de valeurs d'éclairage retenues en renforcement d'entrée :

On peut évaluer les éclairages nécessaires en zone d'entrée à partir de la courbe de luminance calculée selon la méthode exposée au § 1.4., toujours en appliquant la loi de LAMBERT.

Les exemples qui suivent représentent l'exploitation de deux courbes tracées en figures 46 et 49 du § 1.4.2. (axe des ordonnées en cd/m^2).

Pour des raisons pratiques, on ne réalise pas une décroissance continue des éclairages. On trace, à partir de la courbe des luminances, des paliers qui doivent être au-dessus des valeurs calculées considérées comme des minima en fonction des conditions données (voir les détails pratiques aux § 3.2.3. et 3.2.4.).

Afin de montrer l'importance de la clarté de la chaussée, on a tracé l'éclairage nécessaire en trait plein pour une chaussée de facteur de réflexion diffuse égal à 0,15 et en pointillés pour une chaussée de facteur de réflexion diffuse égal à 0,23 (axe des ordonnées en lux).

Il ne s'agit évidemment ici que de montrer, sur deux exemples particuliers, la méthode de passage des luminances de chaussée aux éclairagements en zone d'entrée des tunnels. Les valeurs données découlent des calculs du § 1.4.2. pour l'ouvrage précis concerné et ne doivent en aucun cas être considérées comme absolues et valables pour tout ouvrage et dans n'importe quelle condition.

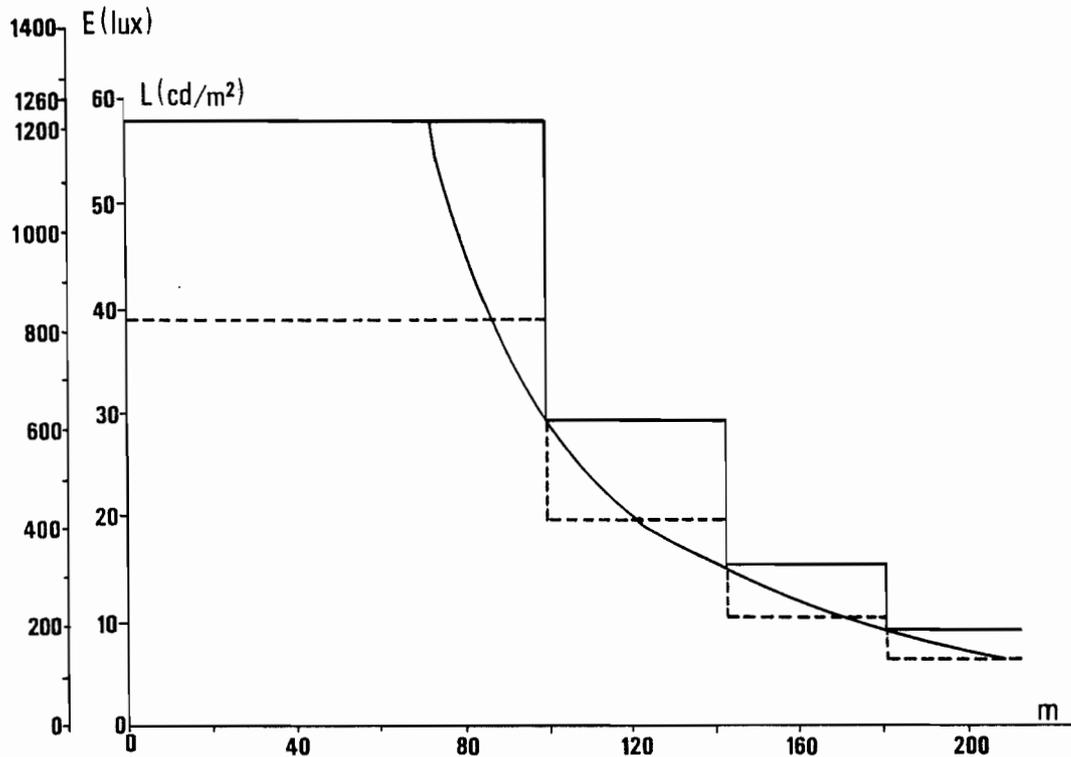


Fig. 77. – Paliers en traits pleins : $\rho = 0,15$.
Paliers en pointillés : $\rho = 0,23$.

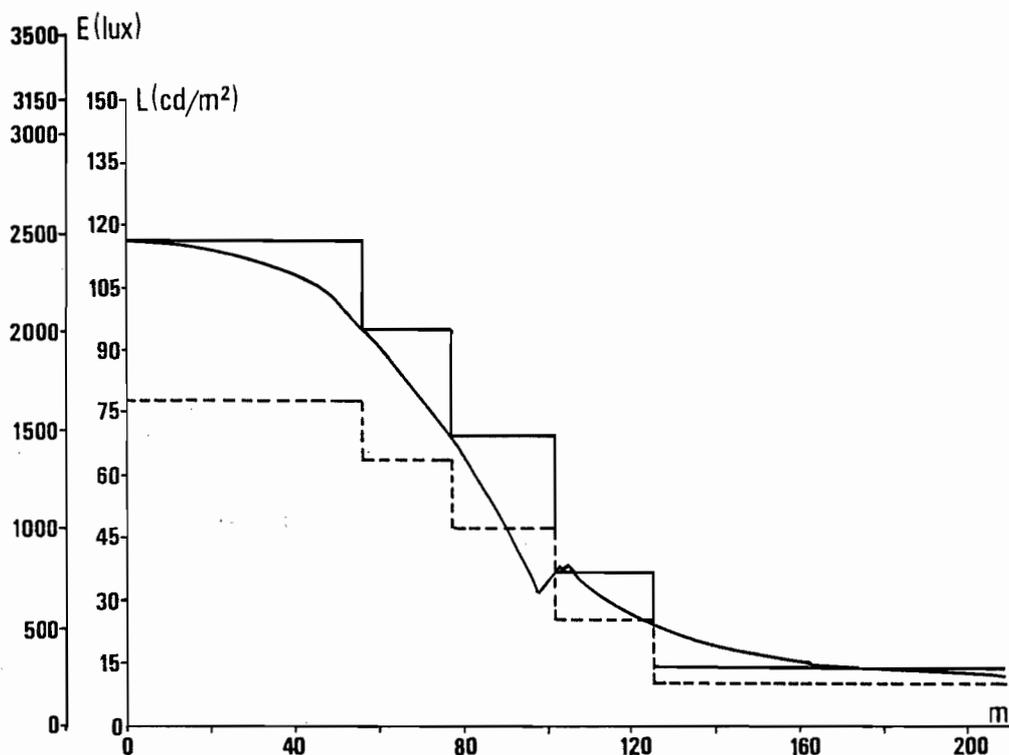


Fig. 78. – Paliers en traits pleins : $\rho = 0,15$
Paliers en pointillés : $\rho = 0,23$

CHAPITRE 2

SYSTEMES D'ECLAIRAGE

2.1. GENERALITES

– On a montré de manière détaillée comment la conception du système d'éclairage est étroitement liée à la quantité de lumière à installer (§ 1.5.). Le choix du système d'éclairage doit donc être fait en même temps que la détermination des niveaux d'éclairement ou de luminance.

– En dehors de l'aspect visibilité, les systèmes d'éclairage utilisés dans les tunnels répondent impérativement aux nécessités de l'exploitation durant toute la vie des installations (le chapitre 5 est consacré à l'exploitation de l'éclairage). Le point commun à tous les systèmes est de placer hors de l'ambiance polluante et corrosive du tunnel les sources et réflecteurs.

– Comme on l'a vu au chapitre 1 de ce guide, il est très difficile de représenter simplement le rendement d'une installation d'éclairage. En effet, la notion flux émis sur la chaussée/ puissance électrique totale consommée, ne peut à elle seule être représentative de la qualité du service rendu à l'utilisateur. Cependant, cette représentation du rapport de la puissance utilisée à la puissance consommée est très utile et permet des comparaisons fiables entre des installations d'éclairage de même type. D'une manière générale, ce rapport est beaucoup plus élevé dans le cas des systèmes à flux dirigé que dans celui d'éclairage diffus où une partie importante de la lumière arrive de manière indirecte sur la chaussée.

2.2. SYSTEMES A FLUX DIRIGE DE TYPE CLASSIQUE

On peut décrire assez simplement ces systèmes de la manière suivante : ils distribuent le flux lumineux directement sur la chaussée et la base des piédroits, de façon à obtenir une luminance de ces surfaces la plus élevée et la plus homogène possible.

La répartition de la lumière est de type symétrique dans le sens longitudinal du tunnel (voir § 1.5.3.2.).

Les sources sont enfermées dans des enveloppes étanches munies d'un réflecteur étudié afin d'obtenir une efficacité maximale.

On s'efforce d'implanter ces appareils en utilisant la place disponible dans la section de l'ouvrage en dehors du gabarit de circulation, sans augmenter la section escavée.

Ces systèmes relativement aisés à projeter, à réaliser et à réceptionner équipent la grande majorité des tunnels français.

Nous reviendrons plus en détail dans les chapitres suivants sur ce type d'éclairage et les différentes façons de le projeter.



Fig. 79 – Tranchée couverte du mas – Firminy – Loire.

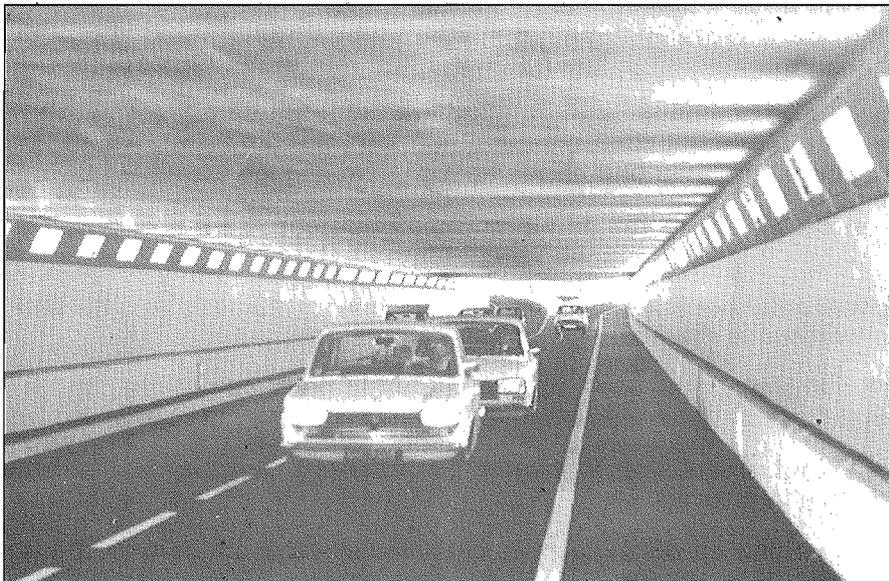


Fig. 80. – Nice : Thiers Grégoire.



Fig. 81. – Paris : Saint Cloud Nouveau.

2.3. SYSTEMES A MOBILISATION DE CONTRASTE

Leur théorie a été longuement expliquée au § 1.5. Nous avons vu, en particulier, tout l'intérêt qu'ils apportent en zone de renforcement d'entrée des tunnels.

A l'heure actuelle, ce type d'éclairage est inexistant en France. Cependant, les progrès techniques permettent de penser que des réalisations vont voir le jour dans un avenir très proche.

En Suisse, où nous rappelons que ces systèmes sont utilisés depuis plus de dix ans, les projecteurs ont gagné sensiblement en performances et en encombrement.

Nous donnons deux photographies permettant de constater l'évolution technique : L'encombrement des appareils et l'éblouissement ont été sensiblement réduits en raison du remplacement des projecteurs inclinés par des appareils à glace horizontale.

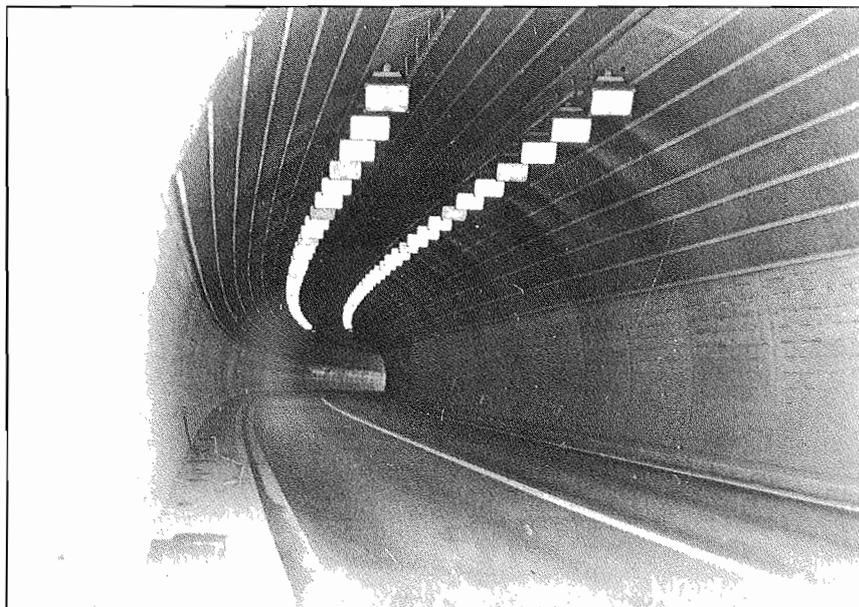


Fig. 82. – Tunnel du Leimern (Suisse).

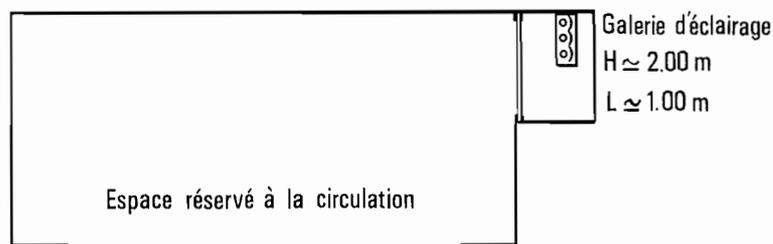


Fig. 83. – Tunnel Rugen sur la N8 (Suisse).

Actuellement, la réalisation d'une installation de ce type en France ne peut être conduite que par certains services spécialisés et nécessite une étude approfondie. Rappelons qu'elle peut entraîner des économies substantielles en énergie consommée.

2.4. GALERIE SPECIALE D'ECLAIRAGE

Le principe consiste à réserver dans le génie civil une galerie, en général visitable, séparée de l'espace de circulation par une paroi translucide d'environ 2 mètres de hauteur ; les sources d'éclairage sont placées derrière cette paroi, à une distance plus ou moins grande contre un miroir sommaire. La lumière est diffusée dans l'ensemble de l'espace réservé à la circulation, c'est-à-dire autant sur la chaussée que sur les piédroits et même le plafond, afin de créer une ambiance lumineuse et pas seulement un éclairage de la chaussée.



L'argument principal conduisant au choix de ce type d'éclairage est la possibilité d'entretien de l'installation à partir de la galerie, sans interrompre la circulation. On doit signaler cependant quelques gros inconvénients :

– Au niveau de la chaussée, l'éclairage vertical est du même ordre de grandeur que l'éclairage horizontal ce qui pose le problème de la vision d'obstacles éventuels, le contraste étant alors très faible (cf. § 1.5.3.).

– L'obtention d'un certain niveau d'éclairage sur la chaussée nécessite une puissance dépensée beaucoup plus grande que dans le cas des systèmes à flux dirigé.

En effet, la conception même d'une telle installation lui confère un rendement médiocre pour les raisons suivantes :

– Pour ce qui concerne l'optique géométrique, les distances source-chaussée sont grandes, les angles d'incidence de la lumière sont rasants, la participation de toutes les parois entraîne une perte de flux sensible à chaque réflexion.

– Pour diffuser la lumière, les vitres sont en verre dépoli qui absorbe plus de flux lumineux que les glaces transparentes des appareils à flux dirigé.

– Les venues de poussière sont plus importantes car l'étanchéité est difficile à maintenir.

Dans ces conditions, en renforcement d'entrée où l'on a vu que les luminances nécessaires sont énormes, la conjonction des deux remarques précédentes conduit à proscrire un tel type d'éclairage.



Fig. 84. – Tunnel du Maine. Intérieur de la galerie d'éclairage.

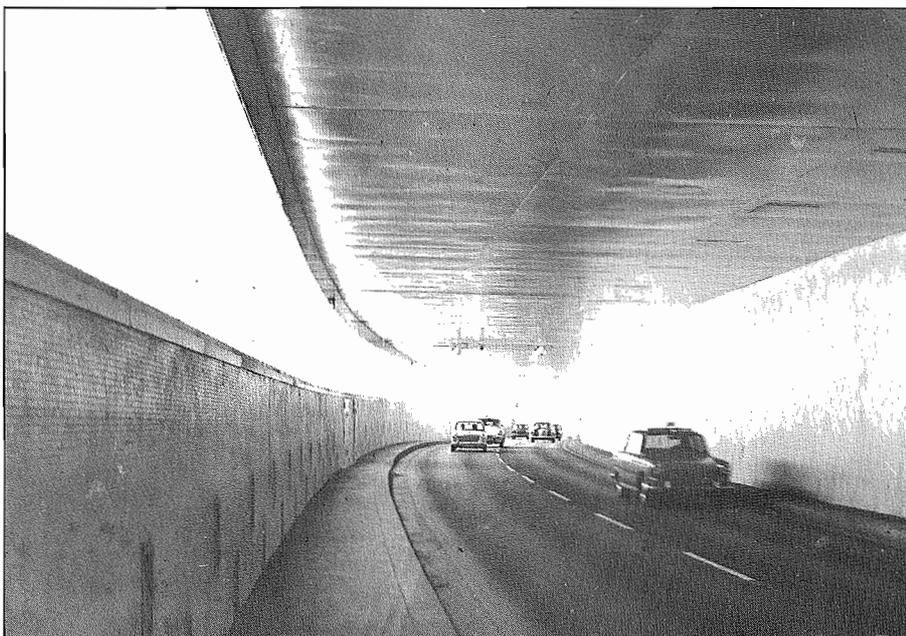


Fig. 85. – Tunnel des Tuileries.

2.5. GALERIE AVEC APPAREILS A FLUX DIRIGE

Il semble que l'avenir des galeries d'éclairage telles que décrites au § 2.4. soit très compromis.

On peut citer cependant une solution intermédiaire entre la galerie classique et les appareils à flux dirigé, comme le montrent les photographies ci-dessous.

Cette solution évidemment plus onéreuse que le système à flux dirigé classique doit être réservée aux ouvrages où toute intervention en tunnel pose des problèmes importants (par exemple en raison de la nature et de la densité du trafic).

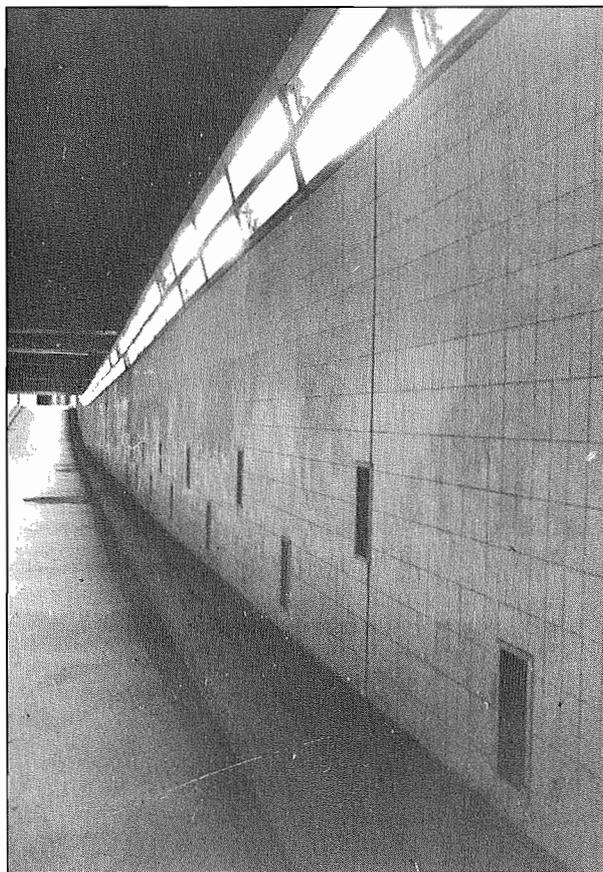


Fig. 86. – Les Halles – Souterrain Berger. Intérieur du tunnel.

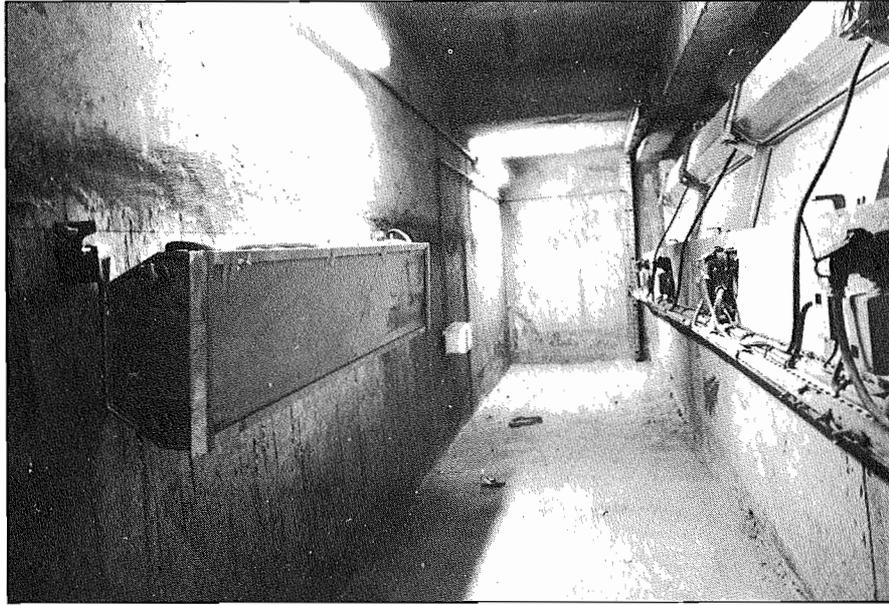


Fig. 87. – Les Halles – Souterrain Berger. Vue de la galerie visitable. Eclairage.

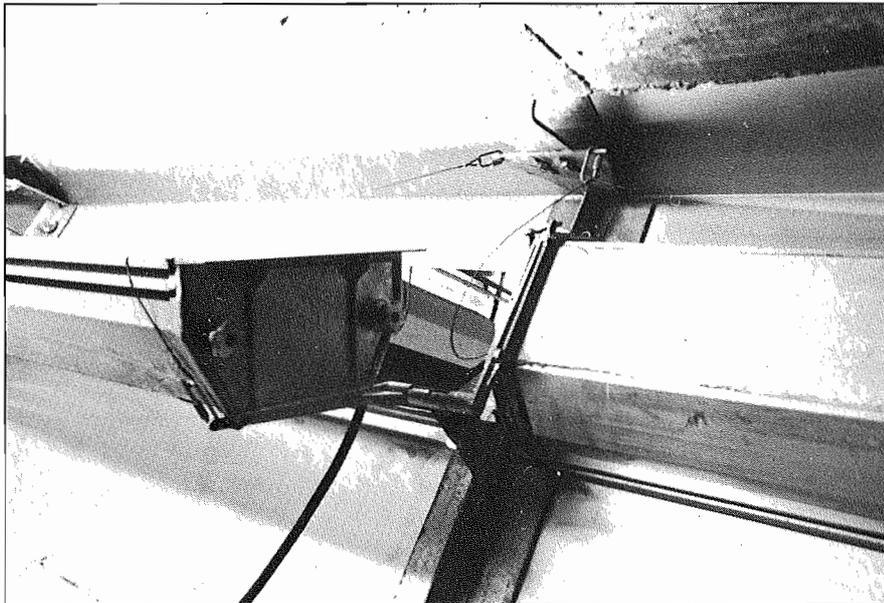


Fig. 88. – Les Halles – Souterrain Berger. Luminaire en position entretien.

2.6. SYSTEMES UTILISANT LA LUMIERE NATURELLE

Ces systèmes sont basés sur les principes suivants :

- Dans l'ouvrage : essayer d'utiliser la lumière extérieure en pratiquant des ouvertures. Ceci concerne plus particulièrement les tranchées couvertes ou les tunnels à flanc de montagne.
- A l'entrée ou à la sortie : prolonger le tunnel par une couverture comportant un maillage de matériaux réfléchissants (Aluminium...) ou une couverture translucide.

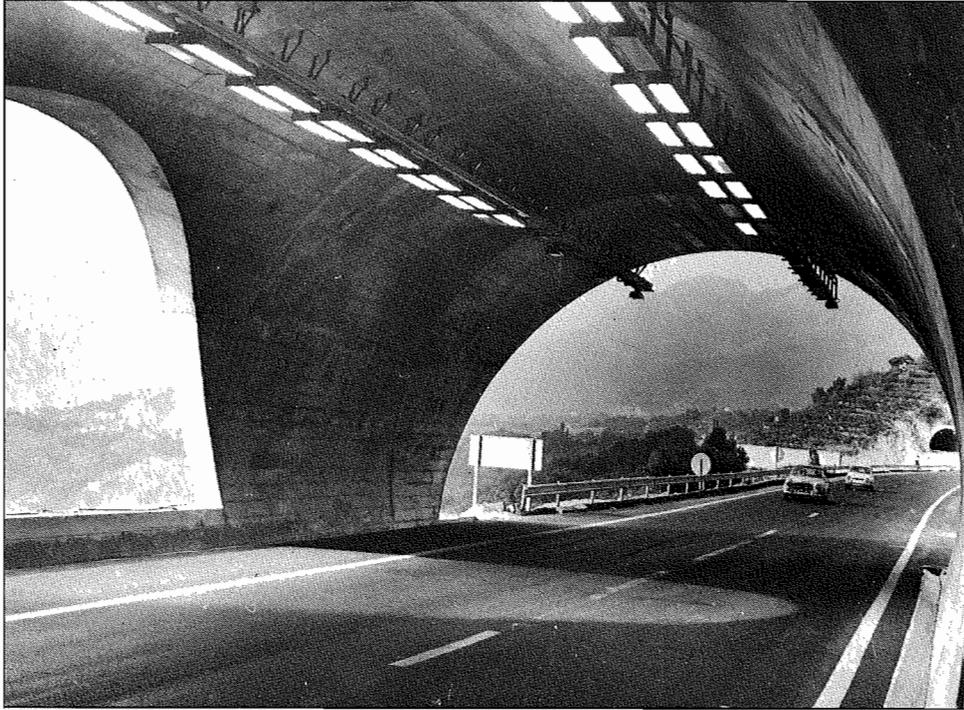


Fig. 89. – La Giraude autoroute A8 Nice.

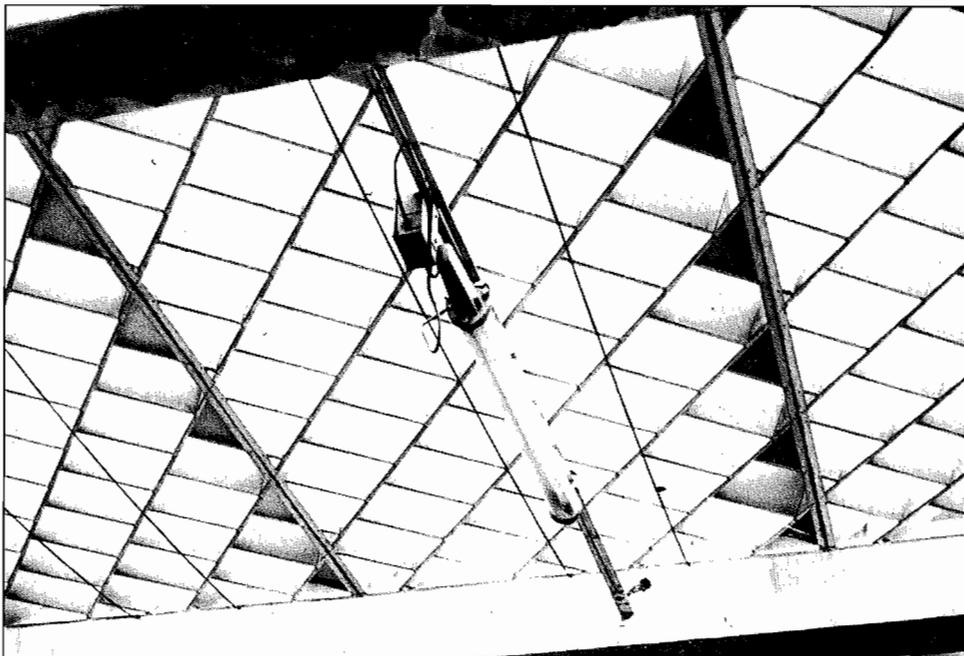


Fig. 90. – Tunnel du Rond Point St-Etienne.

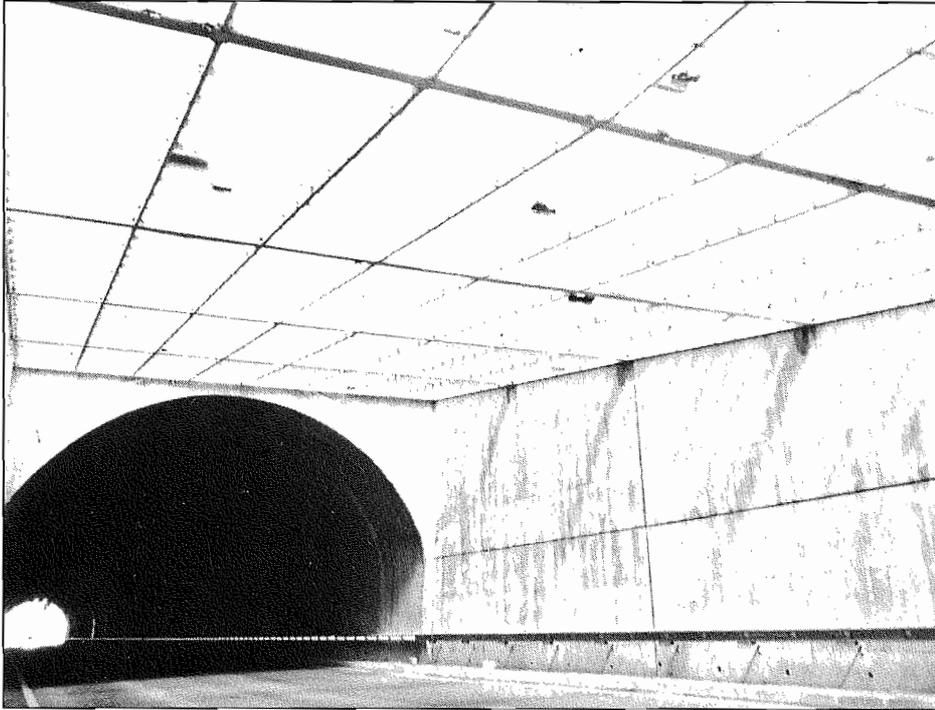


Fig. 91. – Ancienne couverture translucide du tunnel des Pennes Mirabeau (Bouches-du-Rhône).

Ces systèmes paraissent évidemment séduisants car ils diminuent fortement les dépenses en énergie. Cependant leur étude est difficile et nécessite l'intervention d'un service spécialisé.

2.6.1. *Ecrans ajourés*

Jusqu'à présent, ce type d'écrans se composait généralement d'un double réseau de lames verticales ou inclinées en aluminium, de façon à ce qu'aucun rayon solaire ne puisse parvenir directement sur la chaussée, et supportées par une ossature en béton armé ; les lames orientées Nord-Sud, étaient verticales, les lames Est-Ouest en général inclinées vers le Nord de manière telle que les rayons du soleil soient occultés, même au solstice d'été.

Les inconvénients majeurs étaient les suivants :

- Allongement de l'ouvrage dans des zones où la construction est parfois difficile.
- Coût élevé.
- L'hiver, ils retiennent la neige dont la fonte entraîne des désenrobements des agrégats et la formation de verglas.
- Leur pouvoir de réduction de la lumière naturelle, très variable selon le ciel et les heures de la journée, conduisait à prévoir un éclairage artificiel complémentaire diminuant considérablement l'intérêt de tels systèmes.
- Leur salissure (assez rapide) leur faisait perdre une grande partie de leur efficacité, leur nettoyage étant très difficile.

A l'heure actuelle, des recherches menées surtout en Hollande, s'orientent vers des systèmes de paralumes laissant passer une partie de la lumière directe du soleil sur la chaussée. Le principe majeur est que le passage des taches de lumière est beaucoup mieux toléré par l'œil lorsque la fréquence de ces taches 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.

Le point délicat consiste à quantifier la gêne des usagers. Des expériences de visibilité paraissent nécessaires et seront sans doute menées par les instances internationales (C.I.E. et A.I.P.C.R.) dans les années qui viennent.

2.6.2. *Ecrans translucides*

Ce type d'écrans se compose généralement de dalettes translucides (pavés de verre ou matériau plastique) prises dans une ossature en béton, ou métallique; ce système présente les mêmes inconvénients de construction que le précédent; les problèmes de salissure ou d'occultation de la lumière par des chutes de neige nécessitent un entretien très contraignant et onéreux.

En ce qui concerne les matières plastiques, le comportement au feu doit être parfaitement connu. En particulier seront rejetés tous les produits dégageant des fumées toxiques ou coulant sous l'effet d'une forte chaleur.

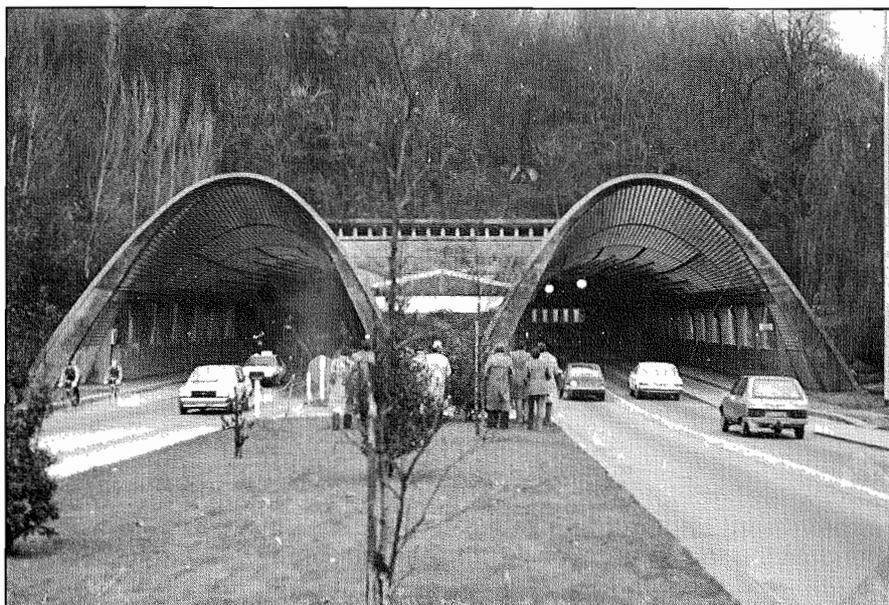


Fig. 92. – Tête du tunnel Jenner (Le Havre).

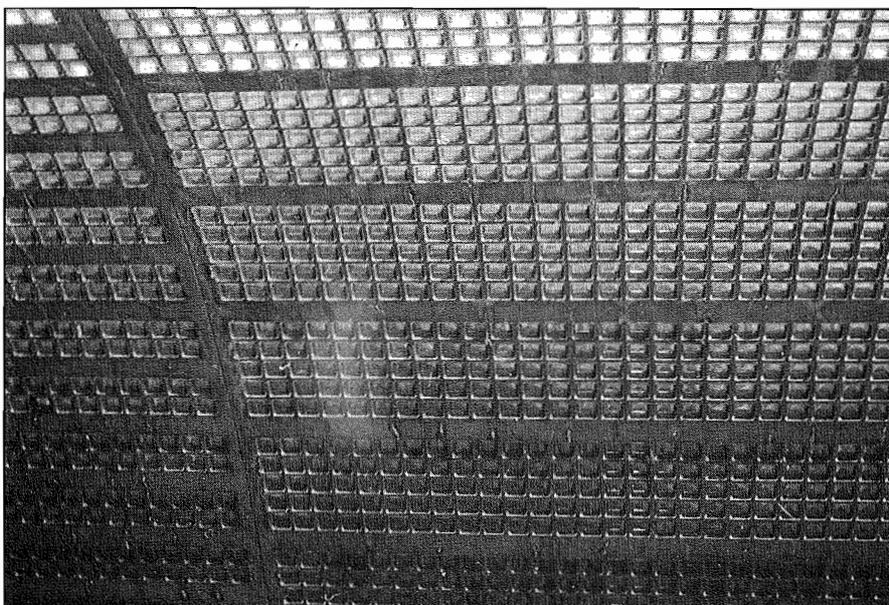


Fig. 93. – Tunnel Jenner. Détail de la voûte translucide, pavés de verre.

2.7. CRITERES DE CHOIX

En fonction de ce qui a été dit dans ce chapitre et dans le § 1.5., la réalisation type économique se compose d'un système à mobilisation de contraste dans la zone de renforcement d'entrée (sur 150 à 300 m) et d'un système à flux dirigé de type classique dans le restant de l'ouvrage.

Il peut être difficile d'appliquer strictement cette règle générale. Nous conseillons au projeteur de consulter un service spécialisé, en particulier dans le cas où le choix des systèmes à employer n'apparaît pas clairement en fonction des critères énoncés précédemment.

Compte tenu des usages actuels, nous développons dans ce qui suit, l'étude des systèmes classiques à flux dirigé. Les niveaux d'éclairage horizontal seront supposés connus, nous nous attacherons à montrer comment les projeter, les réaliser, les réceptionner et enfin les maintenir pendant la vie de l'ouvrage.

CHAPITRE 3

PROJET

3.1. CHOIX DE BASE – CONCEPTION GENERALE – PREMIERE ESTIMATION

3.1.1. *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.

3.1.2. *Choix fondamentaux*

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

Il est nécessaire d'estimer au moins sommairement les conditions d'environnement photométrique des entrées afin de décider, en fonction de tout ce qui précède et en appliquant les règles données dans le chapitre 1 de ce guide, s'il faut installer un éclairage diurne ou nocturne.

Si la décision d'éclairer est retenue, il s'agit, toujours à partir des données précédentes, de fixer la situation de référence en fonction de la vitesse de référence et du système d'éclairage.

Ces choix étant fixés, il est possible d'appliquer la méthodologie exposée au § 1.4. On obtient une courbe de 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 permet de fixer une première estimation du coût par l'intermédiaire des niveaux en éclairements, et de la réalisation de ces niveaux.

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

3.1.3. *Niveaux d'éclairement*

3.1.3.1. *Niveau de section courante*

Le tableau du § 1.9.4. donne les valeurs de luminance de section courante (L_{sc}) ainsi que les éclairements correspondants en utilisant l'approximation à la loi de LAMBERT :

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

Si l'on ne connaît pas la chaussée retenue, à ce stade des études, on utilise un facteur de réflexion diffuse moyen (entre 0,15 et 0,18). La valeur devra être précisée dans le projet détaillé.

3.1.3.2. *Niveaux de renforcement*

a) Entrées

Les niveaux d'éclairement sont directement déduits de la courbe de luminance nécessaire en utilisant les mêmes hypothèses sur la valeur du facteur de réflexion que pour la section courante.

Pour la suite des études, les luminances de voile à prendre en compte ainsi que l'opacité maximale prévisible dans l'ouvrage devront être précisées afin de donner, avec la plus grande précision possible les éclairagements requis.

b) Sorties

Comme il a été signalé au § 1.1.3.2., f. le saut de luminance subi par l'œil à la sortie du tunnel est dans la plupart des cas inoffensif et ne nécessite pas un renforcement de l'éclairage.

A ce stade de l'étude, il faut donc vérifier que l'on n'est pas dans les cas extrêmes suivants :

- Tunnel très long nécessitant une réadaptation progressive à des niveaux de luminance plus élevés ;
- Présence d'un matériau très réfléchissant à la sortie (neige au soleil, étendue d'eau miroitante...).

Si un renforcement de sortie est nécessaire, il n'est généralement pas d'un niveau aussi élevé qu'à l'entrée et une estimation grossière de son coût suffit à ce niveau du projet (voir § 1.4.2.3., c).

3.1.4. Réalisation des éclairagements

3.1.4.1. Remarque

Comme il est dit au § 2.7., nous développons uniquement l'étude des systèmes classiques à flux dirigé. Pour les autres types d'éclairage, la participation d'un service spécialisé paraît indispensable y compris à ce stade du projet.

L'éclairage sera donc réalisé à partir d'appareils étanches et à flux dirigé, situés entre les piédroits, hors du gabarit de circulation.

3.1.4.2. Sources utilisées en tunnels

Trois types de sources sont utilisés en France pour l'éclairage des tunnels. L'annexe 1 leur est consacrée. Les principales caractéristiques sont résumées ci-dessous.

a) Les tubes fluorescents

Leur spectre étalé leur assure, outre une lumière de couleur blanche, un rendu des couleurs satisfaisant. Leur flux unitaire de quelques milliers de lumens conduit à les retenir pour l'éclairage de section courante, dans les puissances 40 et 65 W en Ø 38 (pour mémoire) et 36 et 58 W en Ø 26. Leur longueur relativement importante détermine souvent les dimensions de l'appareil retenu pour l'ensemble de l'installation.

La luminance du tube, très faible ne pose aucun problème d'éblouissement.

L'utilisation d'aluminium comme réflecteur permet un bon contrôle du flux lumineux et le coefficient d'utilisation de l'appareil est élevé.

b) Les sources à vapeur de sodium basse pression

Elles émettent sur un doublet 5890 et 5896 Å qui leur assure pratiquement un rayonnement monochromatique jaune. Elles ne permettent pas le rendu des couleurs, ce qui peut conduire à les rejeter (tunnels urbains, présence de piétons...), mais le monochromatisme sur deux longueurs d'onde voisines de la sensibilité maximale de l'œil leur confère de sérieux avantages pour la vision : augmentation de la faculté d'accommodation, netteté et rapidité de perception, augmentation de l'acuité visuelle et du contraste, amélioration de la visibilité en atmosphère non limpide.

Par ailleurs, la gamme de puissances offre un large éventail de choix et une efficacité lumineuse maximale permet de réaliser des installations intéressantes, tant techniquement que financièrement. Suivant la puissance retenue, leur longueur permet de mettre un ou deux tubes par appareil, et souvent d'incorporer les appareillages nécessaires ; les enveloppes sont de ce fait en général moins longues et donc moins chères que pour les tubes fluorescents.

La luminance apparente de la source relativement élevée est tolérable et ne nécessite pas de prescrire des clauses d'éblouissement.

De plus, il est à noter l'apparition sur le marché d'appareillages dits hybrides, qui outre une amélioration du rendement en lumens par watt, permettent notamment le rallumage instantané des sources à la suite d'une microcoupure de courant. Signalons cependant qu'avec de tels appareillages, les sources subissent une réduction de flux.

c) Les sources à vapeur de sodium haute pression

Quoique émettant une couleur jaune dorée, elles ont un spectre étalé qui permet un rendu des couleurs acceptable. De dimensions restreintes, ces sources trouvent donc facilement place dans les appareils d'éclairage de tunnel, mais il faut tenir compte de l'échauffement peut-être plus sensible au niveau des appareillages (ballasts et amorces) que pour les autres sources.

Les faibles dimensions du brûleur permettent également un meilleur contrôle du flux à l'aide d'optiques de forme élaborée. Le réflecteur joue donc un rôle très important et doit être étudié en fonction de la géométrie de l'ouvrage.

Cependant, et à cause des faibles dimensions du brûleur (la luminance est de plusieurs millions de candélas par mètre carré), des clauses de non éblouissement sont nécessaires pour obtenir le défilement du brûleur et de l'optique, en éliminant toute réflexion directe sur les yeux des conducteurs. Le principe actuellement retenu est celui de lamelles de paralumes placées verticalement contre la face interne de la vitre de l'appareil, ce qui limite la luminance apparente à quelques milliers de cd/m^2 , dans la direction des automobilistes.

Rappelons que dans les ouvrages bidirectionnels, l'emploi de sources sodium haute pression est à déconseiller car les paralumes entraîneraient une chute très nette du facteur d'utilisation, et leur emploi ne serait plus justifié économiquement par rapport à une source sodium basse pression.

En règle générale, on retiendra le sodium haute pression dans les cas où l'on a de forts niveaux d'éclairage à réaliser et lorsque la place disponible pour loger plusieurs files d'appareils n'est pas possible.

d) Utilisation simultanée de sources de types différents

Etant donné l'amplitude des éclairages à réaliser (couramment de 30 à 1500 lux), il est en général rentable d'utiliser plusieurs types de sources dans les différents paliers de l'éclairage d'un tunnel; ceci peut se réaliser en faisant cohabiter dans un même appareil deux types de sources.

3.1.5. *Puissance*

A ce stade des études, on peut retenir les ordres de grandeur suivants :

- Tubes fluorescents : 0,035 à 0,055 W/lux m^2 ;
- Sources sodium basse pression : 0,025 à 0,030 W/lux m^2
- Sources sodium haute pression : 0,025 à 0,035 W/lux m^2 (voire 0,040 W/lux m^2 dans des cas difficiles de défilement des appareils).

3.1.6. *Estimations*

3.1.6.1. *Coût de premier investissement*

Le § 3.3. est consacré au coût de premier investissement.

3.1.6.2. *Dépense annuelle d'exploitation*

Elle comprend l'entretien de l'installation, le renouvellement des sources, les dépenses en énergie électrique.

Au niveau actuel des études, on pourra prévoir, avec une précision suffisante un ordre de grandeur de 10 à 15% du coût de premier investissement par année d'exploitation.

3.2. PROJET DETAILLE

3.2.1. *Objet*

Cette phase précède directement l'établissement du Dossier de Consultation des Entreprises. Elle doit présenter toutes les études particulières nécessaires à l'établissement de l'estimation détaillée.

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

Les principaux points étudiés sont précisés ci-après :

3.2.2. *Présentation des études à effectuer*

A ce stade du projet, on dispose d'une courbe de luminance nécessaire estimée en fonction des paramètres pris en compte dans l'équation fondamentale de visibilité. Il s'agit d'affiner les données afin d'établir la courbe définitive.

Les caractéristiques photométriques de la chaussée devront être connues afin de passer avec la plus grande précision possible des luminances aux éclairages.

On déterminera les différents régimes et on procédera 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...

On choisira le mode de fixation des appareils en fonction de l'ouvrage, on calculera les puissances, les installations de secours, on fixera les dispositifs d'alimentation et de commande, on rappellera (ou précisera si besoin est) les réservations de génie civil.

L'estimation devra être établie le plus précisément possible, le § 3.3. y est consacré.

3.2.3. *Détermination des paliers de suréclairage et des longueurs d'application*

Rappelons (cf. 1.4.1.3. a) qu'il faut définir le plus précisément possible les paramètres suivants :

- Luminance de voile de FRY ;
- Luminance de voile de atmosphérique ;
- Luminance de voile de pare-brise ;
- Vitesse effective des usagers ;
- Situation de référence : L_{ref} (V_{ref} , système d'éclairage) ;
- Opacité moyenne prévue en tunnel.

Le projeteur doit disposer de suffisamment de campagnes de mesures sur le site pour choisir les luminances de voiles parasites L_{F_o} , L_{atm_o} , L_{PB_o} à prendre en compte dans son calcul de la luminance nécessaire.

La courbe de luminance sera obtenue en procédant comme indiqué au § 1.4.

Pour des raisons pratiques, on ne réalise pas un éclairage décroissant de manière continue jusqu'à la valeur de section courante. On trace, à partir de la courbe précédente, des paliers qui devront être au-dessus des valeurs calculées considérées comme des minima en fonction des conditions données : voir le § 1.9.5.

Dans la pratique, on limite le nombre de paliers à 4 ou 5 pour faciliter la réalisation.

En raison de la pénétration de la lumière naturelle dans l'ouvrage, les 5 ou 10 premiers mètres ne seront pas suréclairés.

Le passage de la luminance aux éclairages peut se faire en appliquant l'approximation à la loi de LAMBERT

$$E = \frac{L \cdot \rho}{\rho} \text{ (cf. § 1.9.)}$$

Il faut connaître, à ce stade du projet les caractéristiques photométriques exactes de la chaussée.

3.2.4. Détermination des régimes de fonctionnement

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

3.2.4.1. Régimes des suréclairagements d'entrée

On distingue plusieurs régimes à utiliser en fonction de l'éclairage naturel à l'extérieur.

En général on prévoit :

- Un régime plein soleil correspondant au niveau maximum installé R.;
- Un régime jour couvert égal à R/2;
- Un régime nuit représenté par l'extinction de tous les circuits de renforcement.

Dans les cas où le niveau 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.

3.2.4.2. Régimes des suréclairagements de sortie

En règle générale, on ne prévoira que le régime maximum et l'extinction.

3.2.4.3. Régimes de section courante

On distingue plusieurs régimes, à appliquer en fonction de l'éclairage naturel extérieur, suivant l'heure de la journée, parfois même de l'intensité du trafic ; en fait, il convient de suivre les indications suivantes :

- Régime normal correspondant au niveau maximum installé B ;
- Régime crépuscule correspondant à B/2 ;
- Régime nuit correspondant à B/4 ;
- Il convient en outre, de prévoir un régime sécurité, en cas de panne d'alimentation électrique ; ce régime est pris égal éventuellement à B/8, généralement à B/4 et doit de toute façon rester supérieur à 10 lux (circulaire sur la sécurité dans les tunnels routiers (26)). Le circuit de sécurité doit être secouru par un groupe batterie onduleur ou par un groupe électrogène à temps zéro.

Dans certains cas (tunnels de rase campagne avec deux alimentations EDF indépendantes), le secours par batterie onduleur ou groupe électrogène peut ne pas être envisagé.

3.2.5. Détermination du flux à réaliser

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

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

E : niveau d'éclairage requis, en lux.

\emptyset : 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 sources utilisées 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 0,55 ;
- Pour les sources NaBP : 0,45 à 0,50 ;
- Pour les sources NaHP (appareils équipés de paralumes afin de limiter l'éblouissement) : 0,40 à 0,55. La présence des paralumes disperse les résultats.

Le facteur d'utilisation est très sensible : en particulier, sa valeur peut s'abaisser de moitié par rapport aux ordres de grandeurs donnés si l'on éclaire un tunnel très large par une seule file d'appareils.

M : facteur de maintenance. Il caractérise la politique d'entretien de l'installation en prenant en compte :

- La salissure des appareils liée aux problèmes de nettoyage ;
- Le remplacement des sources lumineuses lié à leur vieillissement entraînant une baisse du flux lumineux ;
- Eventuellement la température de l'ambiance si l'on s'attend à des conditions particulièrement difficiles.

De fait, il est extrêmement variable et peut-être compris entre 0,5 et 1 ; il dépend de la nature des sources et de la politique suivie concernant l'entretien ; il montre l'importance d'un nettoyage fréquent des luminaires, des parois et d'un remplacement régulier des lampes usées.

En pratique, on réalise les projets sur la base d'une bonne politique d'entretien qui permet de prendre un coefficient de 80 % pour tenir compte de la salissure conduisant à un facteur M (salissure + vieillissement) égal à 77 % pour les sources sodium (haute et basse pression) et 72 % pour les tubes fluorescents.

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

W : largeur roulable à éclairer en mètres.

L : longueur de la zone correspondant au niveau E.

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

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

3.2.6. Répartition des appareils

3.2.6.1. 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 un éclairage donné, avec une uniformité correcte de l'éclairage sur la chaussée en fonction des caractéristiques des lampes existant sur le marché, en tenant compte des différents régimes qui seront à réaliser et de plus en veillant à l'économie générale du projet, c'est-à-dire en prévoyant le nombre minimum d'appareils.

Il n'est guère possible de donner une méthode rigoureuse pour cette partie de l'étude ; il est utile cependant de donner un certain nombre de recettes en fonction des différents impératifs qui sont détaillés ci-après.

3.2.6.2. Impératifs à respecter

a) Régimes à réaliser : cf 3.2.4. ci-avant.

b) Uniformité

Comme on le verra dans la préparation du dossier d'appel d'offres, il est nécessaire de prévoir une certaine uniformité longitudinale et transversale ; le projecteur ne dispose en général pas des éléments permettant de prédéterminer cette uniformité au niveau du choix de la répartition des appareils, mais il est bien évident que plus les appareils seront espacés, plus une uniformité longitudinale donnée sera difficile à atteindre par les constructeurs ; en pratique, une répartition conduisant à un espacement des appareils supérieur, au régime maximum, à 10 m, est à déconseiller fortement.

c) Sources disponibles sur le marché

Les tableaux ci-après donnent une liste des sources disponibles actuellement sur le marché, pour les trois types retenus pour les tunnels ; cet éventail, très large, n'est pas illimité et la répartition des appareils devra en tenir compte.

Remarques :

– La puissance des sources varie dans le temps et l'on constate généralement une augmentation de la puissance lorsque la source vieillit; à titre indicatif, pour le sodium basse pression, à 10 000 heures de fonctionnement, cette augmentation est de l'ordre de 10 à 20% de la puissance de la source seule;

– Les puissances des appareillages sont données à titre indicatif et comprennent la puissance (2 à 3 W) des condensateurs;

– La puissance réelle de la source (à 100 h) varie en fonction de la source elle-même (différence sur un même lot) et en fonction de l'appareillage utilisé.

Tubes fluorescents

Les caractéristiques principales sont données dans le tableau de la figure 94.a.

	Puissance nominale source (W)	I.R.C.	Flux lumineux (100 h) (lumens)	Baisse du flux lumineux à 1500 h (%)	Longueur (mm)	Luminance maxi (cd/cm ²)	Puissance appareillage (W)	Puissance totale (W)	Efficacité lumineuse lumens/watt lampe + appareillage
Ø 26 mm blanc industrie	36	66	3 000	– 8%	1200	0,95	10	46	65
	58	66	4 800	– 8%	1500	1,25	14	72	67
Gamme chromatique à haut rendement Ø 26 mm	36	85	3 450	– 5%	1200	1,15	10	46	75
	58	85	5 400	– 5%	1500	1,40	14	72	75

Figures 94.a : Tubes fluorescents – Caractéristiques moyennes.

Sources sodium haute pression tubulaires claires

Les caractéristiques sont données dans le tableau de la figure 94.b.

Puissance nominale source (W)	flux lumineux 100 h (lm)	Longueur (mm)	Luminance moyenne (cd/cm ²)	Puissance moyenne appareillage (W)	Puissance totale moyenne (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
70	6 300	156	300	11/18	85	74
100	10 000	211	300	11/16	114	88
150	16 000	211	340	17/20	168	95
250	27 000	257	360	28/30	280	96
400	48 000	283	550	35/40	438	110

Figure 94.b. – Sources sodium haute pression tubulaires claires. Caractéristiques moyennes.

Sources sodium basse pression

En 1984 est apparue une nouvelle génération de sources sodium basse pression de rendement amélioré et appelée sans doute à remplacer complètement les anciennes sources sodium basse pression. A la date où est imprimé ce guide, nous pensons utile en raison de la sortie très récente de ces nouvelles sources de donner les caractéristiques des deux générations de lampes. On doit préciser de plus que les nouvelles sources sont prévues pour fonctionner avec une nouvelle génération de ballasts afin d'avoir le rendement annoncé dans le tableau de la figure 94-d. Elles peuvent être branchées sans aucun dommage avec des ballasts de l'ancienne génération (lors d'un changement complet de sources sur une installation antérieure à 1984 par exemple) mais donneront alors un rendement inférieur.

La figure 94.c représente les caractéristiques principales des sources sodium basse pression ancienne génération. On remarquera que l'ensemble de ces caractéristiques dépend du ballast (hybride ou classique) (voir aussi § 3.1.4.2.b).

Nom de la source (W)	Longueur (mm)	Luminance moyenne (cd/cm ²)	Ballasts	Puissance nominale source (W)	Puissance totale moyenne (W)	Flux lumineux 100 h (lm)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
35	310	10	Conventionnel	37	57	4 800	84
			Hybride	37	51	4 500	88
55	425	10	Conventionnel	56	76	8 000	105
			Hybride	53	70	7 400	106
90	528	10	Conventionnel	91	123	13 500	110
			Hybride	89	111	13 000	117
135	775	10	Conventionnel	135	171	22 500	131
			Hybride	131	155	21 500	139
180	1120	10	Conventionnel	185	225	32 000	142
			Hybride	180	213	30 500	143

Figure 94.c. – Sources sodium basse pression ancienne génération. Caractéristiques moyennes.

Nom de la source (W)	Puissance nominale source (W)	Flux lumineux 100 h (lm)	Longueur (mm)	Luminance moyenne (cd/cm ²)	Puissance moyenne appareillage (W)		Puissance totale moyenne (W)	Efficacité lumineuse avec appareillage (lm/W)
					Classique	Hybride		
26	27	3 700	310	8	9		36	103
36	35	5 700	425	8		11	46	124
66	65	10 700	528	8		15	80	134
91	90	17 000	775	8		17	107	159
131	130	26 000	1 120	8		24	154	169

Figure 94.d. – Sources sodium basse pression nouvelle génération. Caractéristiques moyennes.

d) Distance entre appareils telle que l'on évitera les phénomènes gênants (papillotement).

Cette distance 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.

La quantification de la gêne entraînée par le papillotement est difficile. Cet effet est dû aux sauts de luminance causés par la vision des sources lumineuses ou de leurs images sur le capot du véhicule ou l'arrière des véhicules précédents. Elle dépend en particulier de la fréquence et de l'amplitude de ces 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.

Schreuder (17) a fait des simulations montrant que les fréquences comprises entre 2,5 et 13 pulsations par seconde avaient un effet gênant sur les usagers, le maximum du désagrément se situant à une valeur voisine de 7 pulsations par seconde.

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 correspondant avec les vitesses usuelles à un espacement des appareils supérieur à 10 m, souvent incompatible avec l'uniformité longitudinale requise, la limite haute entraînant la file continue non concurrentielle sur le plan économique.

L'expérience de très nombreuses installations permet de dire que la gêne réelle des usagers liée à ce phénomène de papillotement n'a jamais été mise en évidence. Ceci est certainement dû à la grande qualité des appareils d'éclairage de tunnel.

e) Economie générale du projet

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

3.2.6.3. Principes d'établissement de la répartition des appareils

a) Type de répartition

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

- File ininterrompue de luminaires longitudinaux ;
- File discontinue.

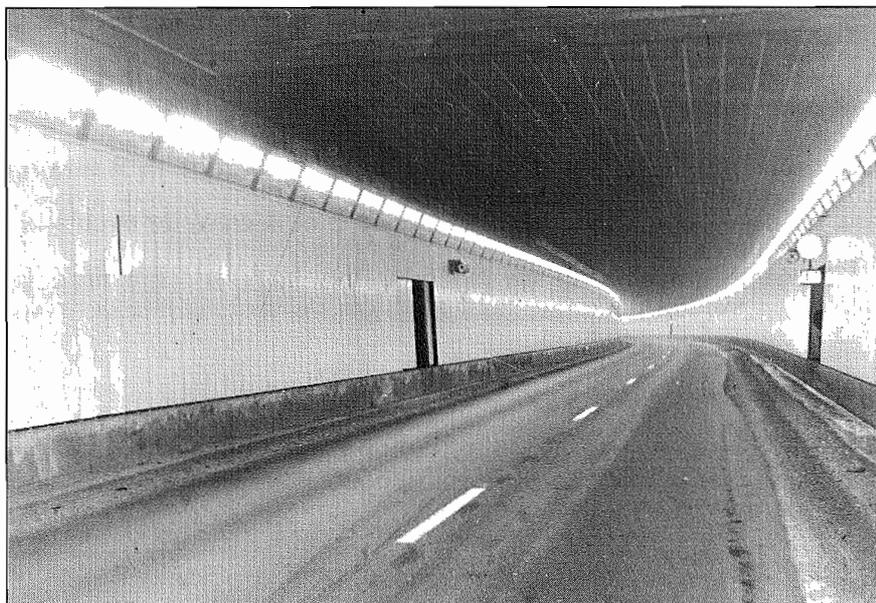


Fig. 95. – Tunnel de Fourvière.

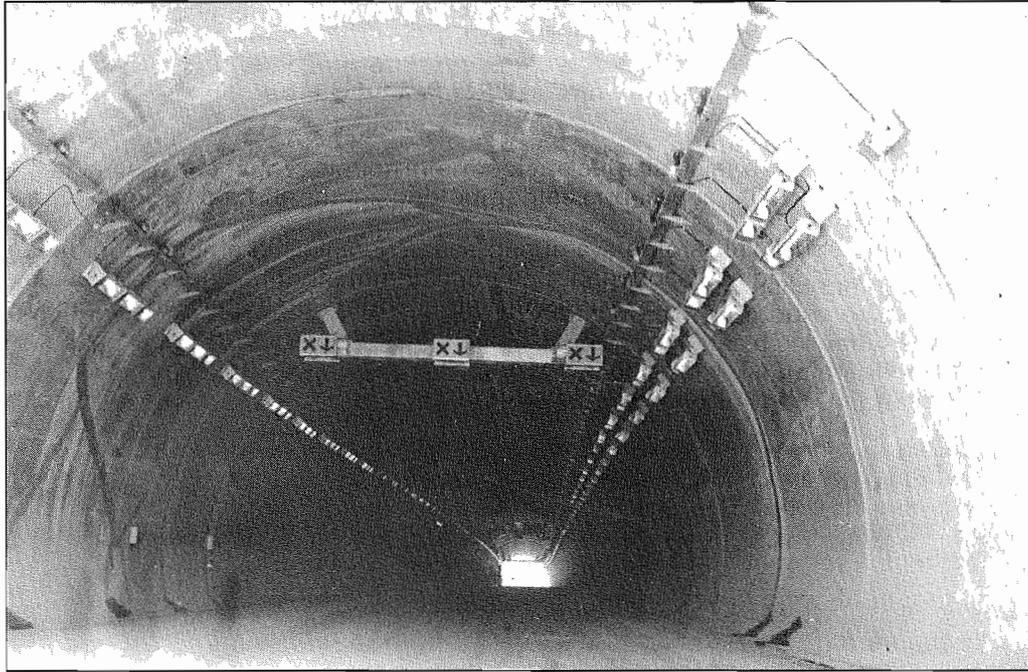


Fig. 96. – A8 Col de Guerre.

Le choix dépend évidemment du niveau à réaliser, mais dans le cas général, on retiendra que la file ininterrompue doit être considérée comme luxueuse et par conséquent peut être choisie dans le cas de tunnels urbains à fort trafic, pour des raisons de confort et étant donné le niveau important à réaliser, alors que la file discontinue constitue le cas général des tunnels de rase campagne; le choix entre ces deux types n'est également pas indépendant du nombre de files d'appareils.

On notera que le choix d'une file ininterrompue devrait logiquement s'accompagner du choix de systèmes permettant de conserver la file continue aux faibles régimes (cf. 3.2.7.3. ci-après) à moins qu'il n'y ait 2 ou plusieurs 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 et de la largeur à éclairer, fonction elle-même du nombre de voies.

En règle générale on dispose :

- 1 file dans les ouvrages à faible niveau, de montagne et dans certains ouvrages urbains, par exemple courbes pour ne pas éblouir les usagers.
- 2 files dans les cas courants pour les ouvrages à 2 et 4 voies de circulation, quel que soit le niveau maximum à installer.
- Exceptionnellement 3 files pour les ouvrages très larges ou qui nécessiteraient un niveau important en section courante, joint au choix de sources peu performantes mais d'aspect agréable.

c) Incorporation des appareillages électriques

La décision d'incorporer ou non dans l'appareil les appareillages électriques nécessaires au fonctionnement des tubes est importante pour la longueur de l'appareil et donc pour la détermination de la répartition et pour les coûts.

On retient en général les dispositions suivantes :

- Tubes fluorescents : les appareillages sont toujours incorporés dans l'appareil, soit en bout, soit derrière le réflecteur;

- Tubes à vapeur de sodium haute pression : les appareillages sont fréquemment à l'extérieur de l'appareil pour des raisons d'échauffement, et surtout lorsque plusieurs sources sont dans le même appareil ;
- Tubes à vapeur de sodium basse pression : les appareillages sont en général incorporés dans l'appareil.

d) Longueur unitaire des appareils

Les longueurs à prendre pour l'encombrement des appareils sont fonction des types de lampes et de la décision d'incorporer ou non les appareillages électriques en bout de l'appareil. Le choix définitif peut n'être fait qu'au niveau de la rédaction du marché ; au niveau présent des études, on retiendra les valeurs données dans le tableau de la figure 97. Au cas où l'encombrement serait critique, le projeteur vérifiera les cotes réelles sur catalogue.

Source	Appareillage incorporé	Appareillage non incorporé
Fluo 40 W ou 36 W	1,4 à 1,5 m	
Fluo 65 W ou 58 W	1,70 à 1,85 m	
NaBP 35 W	0,55 à 0,95	
NaBP 55 W	0,65 à 0,95	
NaBP 90 W	0,75 à 0,95	
NaBP 135 W	1,10 à 1,75	
NaBP 180 W	1,35 à 1,75	
NaBP 2 x 35 W	1,35 à 1,75	
NaBP 2 x 55 W	1,35 à 1,75	
NaBP 2 x 90 W	1,65 à 1,75	
NaBP 2 x 135 W		1,65 à 1,75
NaHP 250 W	0,80 à 0,95	
NaHP 400 W	0,80 à 0,95	
NaHP 2 x 250 W à 4 x 250 W		1,50 à 1,85
NaHP 2 x 400 W à 4 x 400 W		1,50 à 1,85

Fig. 97. – Longueurs des appareils les plus courants.

e) Règles pratiques

En pratique, le projeteur tiendra également compte des quelques règles de détail suivantes :

- Pour la section courante, on utilisera les tubes fluorescents Ø 26, 36 et 58 W, et les tubes à vapeur de sodium basse pression de 35, 55 et 90 W (ou 26, 36, 66 et 91 W).
- Pour les renforcements, on utilisera les sources de très grandes puissances pour les niveaux supérieurs ou égaux à 1200 lux ; pour les autres niveaux, on utilisera les sodiums BP 55, 90 ou 135 W (ou 91 et 131 W), ou les sodium HP 100 W.
- Le nombre de types de sources et d'appareils sera le plus réduit possible – on se limitera généralement à 3 ou 4 types – afin de faciliter l'exploitation et diminuer le stock de rechange.

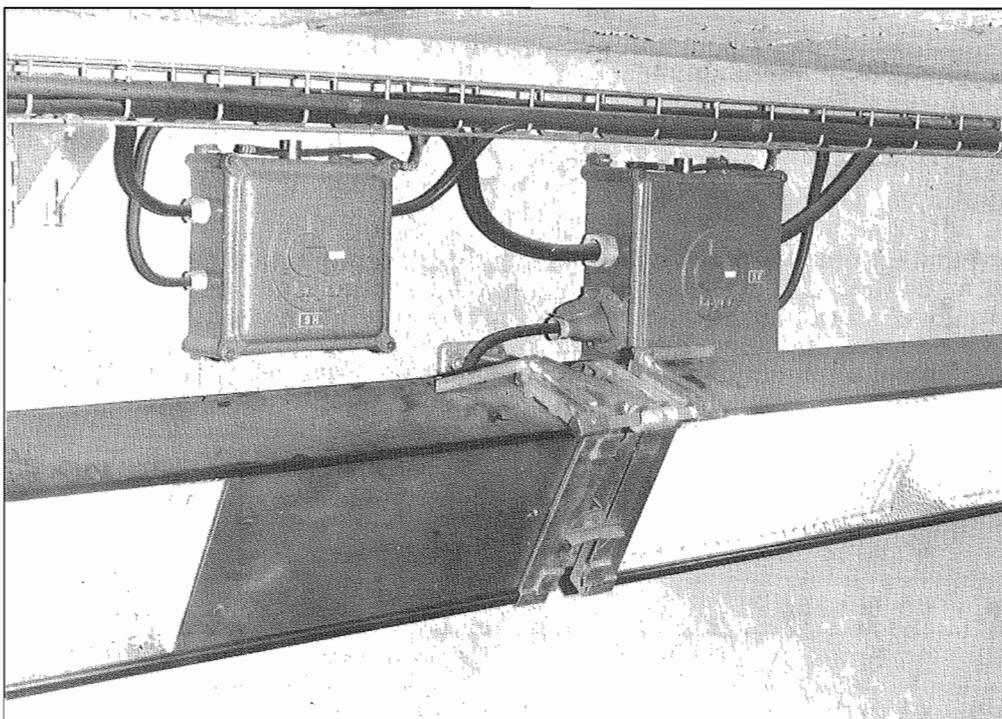


Fig. 98. – A47 – Firminy. Boîtes de dérivation et appareils à appareillage incorporé.

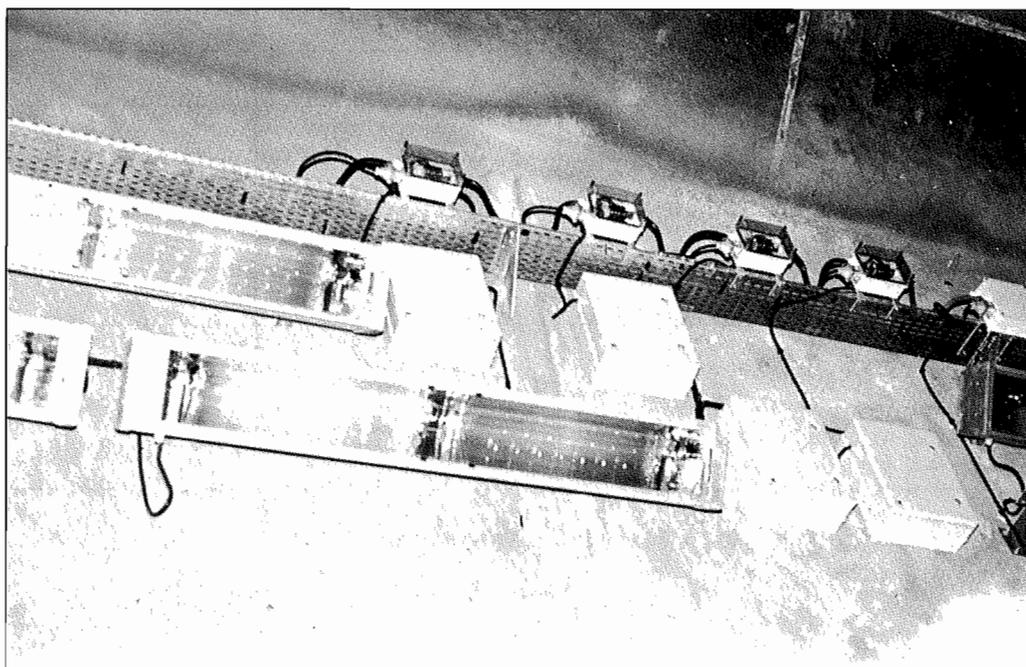


Fig. 99. – A8 – Tunnel de Rosti. Appareils avec appareillages non incorporés situés dans des coffrets étanches (2 x 135 W).

– Afin d'équilibrer le temps de fonctionnement des sources, on prévoira, lorsque la solution retenue le permet, un système (manuel ou automatique) permettant de commuter les circuits d'éclairage.

f) On trouvera en annexe un certain nombre d'éléments concernant les appareils, en particulier leurs caractéristiques mécaniques.

3.2.7. Puissances mises en jeu – alimentation électrique

3.2.7.1. Détermination de la puissance à mettre en œuvre

Les tableaux du § 3.2.6.2.c ci-avant qui donnent pour chaque type de source, la puissance appelée, y compris les appareillages électriques, permettent de faire le bilan des puissances compte tenu de la solution retenue.

3.2.7.2. Mode d'alimentation électrique : généralités

Les considérations concernant l'alimentation électrique ne sont pas fondamentalement différentes de celles concernant les installations industrielles classiques.

Il est à noter que suivant le type d'ouvrage concerné l'éclairage peut constituer la totalité de la puissance (tunnel non ventilé) ou une fraction plus ou moins importante de celle-ci (tunnel avec ventilation forcée par groupes moto-ventilateurs).

En toute hypothèse il conviendra de contacter les services du distributeur d'énergie (E.D.F., Régie...). Suivant la puissance installée l'alimentation électrique de l'ouvrage pourra s'effectuer en moyenne tension (20 kV à 10 kV) avec réalisation d'un poste d'abonné (double dérivation – simple dérivation ou coupure d'artère). Pour des puissances plus faibles (maximum 250 kVA), le raccordement pourra s'effectuer directement en basse tension (220-380 V système borne poste simplifié). Enfin dans certains cas tels que les réseaux ruraux on pourra utiliser les postes MT/BT sur poteau ou bas de poteau.

3.2.7.3. Alimentation électrique – secours

Le principal point particulier de l'alimentation électrique des tunnels routiers concerne l'alimentation de secours. Une panne d'alimentation peut en effet provoquer suivant l'importance de l'ouvrage, un danger. De plus la circulaire n° 81.109 du 29.12.81 relative à la sécurité dans les tunnels routiers (26) définit les dispositifs et équipements de sécurité et les mesures d'exploitation à prévoir dans les tunnels routiers situés sur le réseau national.

En pratique et en particulier pour les tunnels importants on peut se prémunir en alimentant l'installation à partir de câbles différents provenant de sous-stations différentes du distributeur. Il est possible également d'obtenir le classement de l'ouvrage au plan Croix Rouge (alimentation prioritaire), ou de mettre en œuvre un groupe électrogène de secours.

Enfin il est recommandé, voire obligatoire – cf. circulaire n° 81.109 d'alimenter un certain nombre d'appareils d'éclairage de section courante (cf. 3.2.4.3.) par un système batterie-onduleur capable d'assurer une demi-heure d'alimentation ou à la rigueur par d'autres moyens similaires (groupe électrogène à temps zéro).

3.2.7.4. Gradateurs et systèmes de variation de flux lumineux

Comme indiqué en 3.2.6.3. ci-avant le choix d'une file ininterrompue de luminaires doit logiquement s'accompagner du choix de gradateurs de lumière permettant de conserver l'éclairage continu aux faibles régimes.

Cette solution est à peu près abandonnée aujourd'hui. Il convient néanmoins de souligner l'arrivée sur le marché de différents systèmes permettant de faire varier la puissance lumineuse des sources, en particulier les sources sodium haute pression.

Dans certains cas l'utilisation de l'un des systèmes peut être envisagée pour la réalisation de régimes intermédiaires même dans le cas de solution discontinue. Il convient cependant d'être prudent dans la phase actuelle, tous les systèmes proposés ne présentant pas les garanties de bon fonctionnement souhaitables.

3.2.8. Dispositifs de commande

Voir également le § 1.4.3.2.

Leur rôle est de commander le fonctionnement des différents régimes de marche des renforcements et de la section courante, en fonction des conditions extérieures; leur bon dimensionnement et leur bon fonctionnement sont essentiels pour assurer la sécurité avec les plus faibles dépenses d'énergie possibles :

A ce niveau des études, il convient de faire le choix entre les dispositifs suivants qui sont :

– La commande manuelle locale ou à distance ; elle nécessite la présence effective d'un agent capable de modifier les régimes de manière appropriée ; elle est d'un coût pratiquement nul en premier investissement ;

– La commande automatique :

● Par horocontacteur, en général utilisé pour le passage des éclairagements diurnes aux éclairagements nocturnes (et vice-versa) en liaison avec l'éclairage public.

● Par capteur photométrique – en général cellule photoélectrique – pour les régimes diurnes (éclairage de renforcement) ; ces cellules doivent être implantées à une cinquantaine de mètres au moins avant l'entrée en tunnel et face à celle-ci ; elles ne devront pas recevoir de rayons solaires directs. On prévoit deux ou trois seuils de déclenchement selon le nombre de régimes de renforcement retenus.

On conçoit généralement un passage manuel prioritaire sur la commande automatique. Cela peut être très utile pour des conditions exceptionnelles (accident...) ou plus courantes (travail de nuit dans l'ouvrage...) d'exploitation.



Fig. 100. — Tunnel de Pessicart. Cellules regardant l'entrée positionnées sur un mât.

3.2.9. *Positionnement et fixation des appareils et des câbles*

3.2.9.1. *Positionnement des appareils*

Le meilleur positionnement varie selon la forme du tunnel et le nombre de files d'appareils :

- Si on dispose d'une seule file, on l'implantera en général en clé de voûte d'un tunnel voûté et dans l'angle d'un piédroit pour un tunnel cadre.
- Lorsqu'on dispose de deux files, on les implantera en général dans les deux angles supérieurs des piédroits pour un tunnel cadre ; pour un tunnel voûté, le meilleur emplacement semble être l'axe des voies extrêmes de circulation. En cas de B.A.U, côté droit, on pourra également prévoir la file correspondante à la limite entre la voie lente et la bande d'arrêt d'urgence.

On tiendra compte également du problème du tracé en plan. En particulier, l'axe d'origine sera implanté au milieu de l'ouvrage, une adaptation étant à faire pour la pose des appareils sur chaque côté dans les courbes.

- La troisième file éventuelle sera implantée au mieux des possibilités, en veillant à en faciliter l'entretien.

Dans tous les cas, on veillera à ce que la distance minimale des appareils du gabarit réservé à la circulation soit d'au moins 25 cm. Ce problème d'implantation est important pour les tunnels cadres et les tunnels voûtés avec présence d'un faux plafond de ventilation. Il faut alors vérifier très exactement les disponibilités offertes pour l'installation d'éclairage (appareils, consoles de fixation, chemin de câbles et éventuellement coffrets annexes). Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de modifier le génie civil.

3.2.9.2. *Positionnement des câbles d'alimentation*

Les câbles d'alimentation basse tension et éventuellement les appareillages électriques, doivent être situés à proximité immédiate des appareils ; ils sont en général placés sur les chemins de câbles situés immédiatement au-dessus ou derrière les appareils d'éclairage.

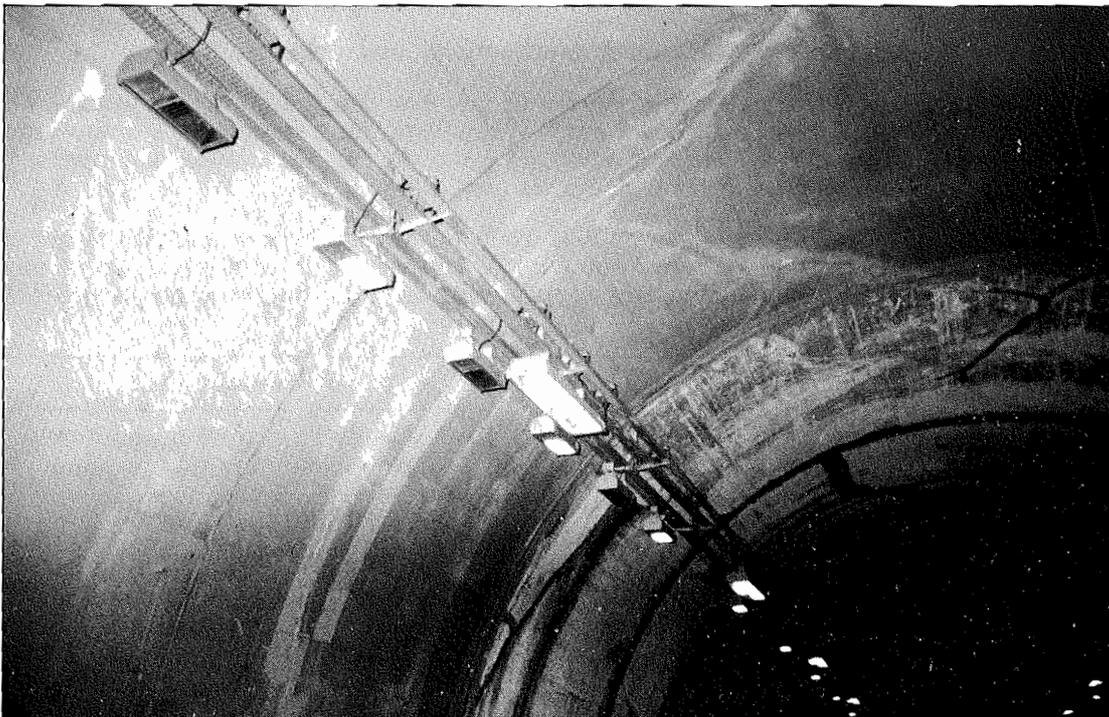


Fig. 101. — Tunnel des Monts.

3.2.9.3. Fixation des appareils et des câbles

Les dispositifs de fixation des appareils et des câbles doivent être étudiés soigneusement eu égard aux conditions particulières de l'atmosphère des tunnels et aux nécessités de pouvoir procéder aisément à des opérations d'entretien qui par nature sont malaisées.

Le système de fixation des appareils devra permettre une pose et une dépose aisée du luminaire; il est en particulier souhaitable de prévoir une position du luminaire dite d'entretien qui facilite l'accès et qui est généralement différente de la position normale en fonctionnement pour les files continues qui tendent d'ailleurs à disparaître.

Les câbles seront en général posés sur un chemin de câbles à proximité des appareils. Pour faciliter l'exploitation on prévoira l'alimentation des appareils par raccordement à des boîtes de dérivation situées sur le chemin de câbles.

3.3. COUT DE PREMIER INVESTISSEMENT

3.3.1. Conditions générales d'estimation

Suivant le stade des études deux modes d'estimation sont possibles :

- Les prix de référence applicables au stade des choix de base et de la première estimation ;
- Les prix unitaires applicables au stade du projet détaillé et pour une solution définie.

3.3.2. Prix de référence

Les prix indiqués ci-après représentent des valeurs moyennes obtenues à partir de l'analyse des marchés passés en France ces dernières années. Il importe de préciser qu'ils résultent, de ce fait, d'une situation de concurrence entre les entreprises soumissionnaires et qu'ils peuvent être sensiblement supérieurs pour des situations différentes. Ils correspondent par ailleurs à des installations classiques et ne prennent donc pas en compte les singularités qui pourraient éventuellement être projetées à certaines fins architecturales...

Les prix sont donnés hors taxes aux conditions économiques d'octobre 1983.

Ils comprennent la fourniture et la pose de l'ensemble des matériels constituant une installation d'éclairage, à savoir les appareils d'éclairage, les sources, les appareillages auxiliaires, les châssis de fixation, les chemins de câbles et les câbles d'alimentation électrique basse tension à l'aval des tableaux de distribution.

Ils sont établis de manière distincte pour la zone de section courante et les zones de renforcement, la grandeur de référence étant, dans les deux cas, le nombre de lux.m² de la chaussée : somme des produits "surface roulable éclairée" par "nombre de lux réalisés" des différentes sections.

	Tunnel de montagne faiblement éclairé	Tunnel autoroutier ou de rase campagne	Tunnels urbains	
			Files discontinues	Files continues (bandeau)
Zone de section courante (Francs/lux.m ²)	NaBP 1,8	NaBP 1,3	Fluo + NaBP ou NaHP + Fluo 1,5	Fluo 2,2
Zone de renforcement (Francs/lux.m ²)	NaBP 0,6	NaBP ou NaHP 0,4	NaBP ou NaHP 0,4	NaHP 0,4

Fig. 102. - Prix hors taxes de référence en Francs/lux.m² octobre 1983 pour différentes catégories de tunnels.

Les valeurs ci-dessus sont à considérer comme des moyennes, une fourchette de plus ou moins 20% étant à appliquer en fonction des caractéristiques géométriques et technologiques retenues et suivant les aléas du marché.

3.3.3. Prix unitaires

Les prix unitaires indiqués ci-après concernent la fourniture des principaux matériels spécifiques constituant l'installation d'éclairage. Les prix de pose devront être définis par le projeteur en fonction des caractéristiques propres du tunnel et de l'installation.

Ces valeurs sont à considérer comme des prix moyens, une fourchette de $\pm 20\%$ devant être appliquée en fonction de l'importance de l'installation, une installation importante permettant des séries plus rentables.

Une majoration forfaitaire de 10% sera à appliquer au résultat obtenu pour tenir compte des frais d'études, des frais d'installation de chantier, des frais de réception et du lot de pièces de rechange.

3.3.3.1. Appareils d'éclairage

Le terme appareil comprend ici l'enveloppe étanche équipée du ou des réflecteurs et de la prise de raccordement au réseau. Les prix sont donnés hors taxes au premier trimestre 1984.

Le prix des sources lumineuses n'est pas inclu. Il est donné au § 3.3.3.2.

a) Appareils d'éclairage pour tube fluorescent

- Pour sources 58 W, longueur 1,75 m : 1 800 F
- Pour sources 36 W, longueur 1,45 m : 1 600 F

b) Appareils d'éclairage pour sources sodium basse pression

- File continue.

Généralement, en file continue, la longueur des appareils n'est pas modulée en fonction de la source mais établie sur la base de la source la plus encombrante possible.

- Pour une source par appareil : 1 800 F.
- Pour deux sources par appareil : 2 200 F.

- File discontinue.

En file discontinue, la longueur des appareils étant modulée en fonction de la source, la gamme des prix s'étend de la manière suivante :

- D'une source 26 W, 35 W ou 55 W par appareil 1 200 F
- A une source 180 W par appareil 1 800 F
- De deux sources 26 W, 35 W ou 55 W par appareil 1 700 F
- A deux sources 90 W par appareil 2 200 F

c) Appareils d'éclairage pour sources sodium haute pression

- File continue

- Pour une source par appareil 2 000 F
- Pour deux sources par appareil 2 400 F

- File discontinue

- Appareil pour une source 1 400 F

Les appareils sont à peu près identiques pour les sources de 150 W à 400 W. On peut retenir les moyennes suivantes :

- Appareil pour deux sources jusqu'à 2 x 250 W 2 000 F
- Appareil pour deux sources jusqu'à 2 x 400 W 2 400 F

3.3.3.2. Sources

Les prix donnés di-dessous sont des prix de marchés hors taxes moyens, constatés pour les sources utilisées en tunnel, au deuxième semestre 1984.

Tubes fluorescents :	
- Blanc industrie	17 F
- Chromatique à haut rendement	34 F
Sources sodium haute pression	
- 70 W	225 F
- 100 W	250 F
- 150 W	300 F
- 250 W	365 F
- 400 W	400 F
Sources sodium basse pression	
- 35 W	185 F
- 55 W	210 F
- 90 W	260 F
- 135 W	350 F
- 180 W	485 F
Nouvelle gamme apparue en 1984 :	
- 26 W	210 F
- 36 W	230 F
- 66 W	290 F
- 91 W	390 F
- 131 W	520 F

Bien que les valeurs données ici soient très inférieures à celles des catalogues des constructeurs de sources de lumière, on peut s'attendre à les voir diminuer de manière sensible, notamment en ce qui concerne les sources sodium haute pression, suivant les conditions du marché (concurrence, quantité fournie...).

3.3.3.3. Appareillages auxiliaires

Le terme appareillage auxiliaire comprend l'amorceur, le ballast, les condensateurs nécessaires au fonctionnement de la source. Comme pour les sources, il s'agit de prix de marchés hors taxes moyens constatés au deuxième semestre 1984.

Appareillages pour tubes fluorescents	110 F
Appareillages pour sources sodium haute pression :	
- 70 W	300 F
- 100 W	370 F
- 150 W	390 F
- 250 W	510 F
- 400 W	560 F
Appareillages pour sources sodium basse pression :	
- 35 W	325 F
- 55 W	460 F
- 90 W	585 F
- 135 W	755 F
- 180 W	805 F
Appareillages pour la nouvelle gamme de sources sodium basse pression :	
- 26 W	325 F
- 36 W	500 F
- 66 W	600 F
- 91 W	770 F
- 131 W	825 F

De même que pour les sources, les valeurs données ici ne sont qu'indicatives.

3.4. PROCEDURE D'ETUDES POUR LES OPERATIONS OU L'ETAT EST MAITRE D'OUVRAGE

3.4.1. Objet

Lorsque l'Etat est Maître d'Ouvrage, le projet doit être conduit suivant des directives précises.

Ce Guide n'est pas destiné uniquement à des opérations de ce type, c'est pourquoi nous n'avons pas fait de références exclusives aux textes en vigueur concernant la procédure légale particulière applicable, dans les § 3.1., 3.2. et 3.3.

Le paragraphe 3.4. montre que les différentes étapes du projet détaillées précédemment correspondent bien à la consistance des études demandée dans le cadre du ministère des transports aux stades de l'avant-projet et du projet.

Le texte officiel auquel il est fait référence est le Bulletin Officiel du Ministère de l'environnement et du Cadre de Vie et du Ministère des Transports, Fascicule spécial n° 81-14 bis, circulaire n° 81-23-3/5 du 25 mars 1981 relative aux modalités d'établissement et d'instruction des dossiers techniques concernant les opérations d'investissements routiers (27).

3.4.2. Procédure applicable aux ouvrages d'art non courants

3.4.2.1. Ouvrages d'art non courants concernant ce guide

Au sens de la circulaire précédemment citée, sont inclus dans les ouvrages d'art non courants :

- Les tunnels de plus de 50 mètres ou de longueur moindre lorsque la hauteur de couverture à une extrémité est inférieure à l'ouverture entre piédroits.
- Les tranchées couvertes de plus de 300 mètres, ou de longueur moindre lorsque se posent des problèmes particuliers de conception du génie civil ou des équipements, d'exécution ou d'exploitation.

3.4.2.2. Schéma directeur des études

Les études doivent comporter :

- Un avant-projet comprenant :
 - Un rapport de synthèse ;
 - Un sous-dossier : études préalables ;
 - Un sous-dossier : présentation de la solution proposée
- Un avant-projet d'ouvrage d'art non courant (APOA).
- Un projet de définition donnant tous les éléments techniques nécessaires à l'établissement du dossier de consultation des entreprises.

3.4.3. Rôle des différentes phases pour un projet d'éclairage de tunnel. Correspondance avec les § 3.1. et 3.2.

3.4.3.1. Avant-projet

Il doit fournir les éléments permettant le choix d'une solution technique, la détermination de ses principales caractéristiques et la fixation de l'estimation correspondante.

Le § 3.1., intitulé "choix de base, conception générale, première estimation" répond aux caractéristiques de l'avant-projet.

3.4.3.2. A.P.O.A.

Il a pour but de compléter, pour les ouvrages d'art non courants, les études générales d'avant-projet. Les études spécifiques effectuées à ce stade doivent permettre d'arrêter les principales caractéristiques de l'ouvrage et d'en fixer l'estimation.

Pour ce qui concerne l'éclairage, L'A.P.O.A. doit être considéré comme la base du projet de définition et par conséquent présenter des études suffisamment détaillées.

Le § 3.2. intitulé "projet détaillé" correspond à un A.P.O.A.

3.4.3.3. *Projet de définition*

Les études de projet doivent fixer avec toute la précision nécessaire les caractéristiques et dimensions des différents éléments de l'opération afin d'en permettre l'exécution sans autres études complémentaires qu'éventuellement celles relatives aux plans d'atelier et de chantier.

En ce qui concerne l'éclairage des tunnels routiers, le projet de définition doit fournir tous les éléments techniques nécessaires à l'établissement du dossier de consultation des entreprises (D.C.E.) ainsi qu'une estimation détaillée. D'autre part, en raison des études spécifiques menées dans le cadre de l'A.P.O.A. le projet de définition contiendra les éléments provenant de l'avant-projet d'ouvrage d'art non courant ou pourra renvoyer au dossier correspondant.

La frontière n'est donc pas franchement marquée, pour le cas qui nous concerne, entre l'A.P.O.A. et le projet de définition. Un A.P.O.A. suffisamment détaillé peut servir de base à l'élaboration du D.C.E.

CHAPITRE 4

MARCHE ET REALISATION

Tous les éléments techniques et financiers sont supposés connus; il s'agit alors et successivement :

- D'établir le dossier de consultation des entreprises qui devra présenter les choix effectués par le Maître d'Ouvrage tout en permettant aux entrepreneurs d'exprimer leur technicité
- De procéder au jugement des offres et de rédiger le marché correspondant
- De suivre la réalisation et d'effectuer les essais de réception.

Le présent chapitre a pour but de présenter les dispositions techniques à retenir, à l'exclusion des dispositions administratives pour lesquelles on se réfèrera aux textes en vigueur.

4.1. **LE DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES**

4.1.1. **Procédure de passation des marchés**

4.1.1.1. Le projeteur aura, sur un plan général, à se référer au code des Marchés Publics; les indications contenues dans le présent chapitre ont uniquement pour but de guider le projeteur dans le choix de la procédure de passation d'un marché d'éclairage de tunnels.

4.1.1.2. Le projeteur dispose au plan général de trois procédures :

- Les marchés par adjudication : cette procédure n'est normalement pas à appliquer dans le cas présent en raison de la spécificité et la technicité des matériels ou dispositions requises, le critère "prix" n'étant pas le seul facteur déterminant du choix de l'entreprise.
- Les marchés négociés : cette procédure n'est pas non plus normalement applicable dans le cas présent, l'éclairage des tunnels ne répondant généralement à aucun des huit cas prévus au code des marchés publics, sauf cas particulier.
- Les marchés sur appels d'offres qui restent la seule procédure normale, le cas général étant constitué par "l'appel d'offres restreint", étant donné la technicité nécessaire pour les candidats.
- Certains cas d'éclairage spéciaux, qui ne relèvent d'ailleurs pas du présent document, peuvent cependant conduire normalement à un marché négocié ou un marché sur appel d'offres avec concours.

4.1.1.3. Le projeteur a, en général, le choix de dissocier ou non le marché d'éclairage des marchés des autres équipements, voire du génie civil de son tunnel; il est généralement recommandé de séparer non seulement les équipements du génie civil, mais même parfois l'éclairage des autres équipements pour peu que ceux-ci constituent une tâche importante (ventilation notamment); par contre, dans le cas où les équipements d'un tunnel seront essentiellement constitués par une installation d'éclairage, on aura intérêt à passer un marché d'ensemble, y compris l'alimentation électrique et les équipements de sécurité.

4.1.1.4. Enfin, le projeteur peut également avoir le choix entre passer un marché spécial pour la fourniture des appareils d'éclairage (marché constructeur) ou un marché global pour la fourniture et la pose de l'ensemble de l'installation y compris les châssis de fixation, les chemins de câbles et l'alimentation électrique (marché installateur); le "marché constructeur" est le seul qui permette de maîtriser correctement les paramètres de l'opération, qu'ils soient techniques ou économiques mais nécessite un travail de coordination plus important.

4.1.1.5. *Délais de réponse*

Quelle que soit la procédure retenue, on s'attachera à réserver un délai de réponse suffisant afin de permettre aux entreprises une bonne étude du projet.

Dans le cas d'un marché unique (pose et fourniture), ce délai doit être supérieur à deux mois.

Si l'on passe deux marchés séparés (fourniture puis pose) les délais s'ajoutent et doivent être correctement prévus.

4.1.1.6. En résumé, et dans le cas général, on utilisera la procédure du marché sur appel d'offres restreint, pour l'ensemble des équipements liés à l'installation d'éclairage, y compris les serrureries et l'alimentation électrique, en y ajoutant les installations de sécurité pour les tunnels ne possédant pas d'installation de ventilation. On laissera aux entreprises un délai de réponse suffisant.

4.1.2. *Clauses techniques des cahiers des charges*

4.1.2.1. Au plan général, le but du présent chapitre n'est pas de proposer un modèle de C.C.T.P., mais d'attirer l'attention du projeteur sur les principales clauses techniques spécifiques à un éclairage de tunnel. On suppose, en outre, qu'il existe un projet de base préparé par le projeteur, sur lequel les concurrents devront répondre, liberté leur étant laissée de proposer des variantes, essentiellement sur le nombre de sources et d'appareils (procédure de l'appel d'offres avec variantes).

Dans ce qui suit, nous citons à plusieurs reprises la norme NFC 71.110 (28). Sur le plan international, la norme CEI 598 (29) reprend en intégralité les points mentionnés dans la norme NFC 71.110. On peut donc se référer indifféremment à l'une ou l'autre.

4.1.2.2. *Prescriptions mécaniques*

a) Résistance mécanique

Les appareils devront satisfaire à la norme C 71.110 concernant la résistance aux contraintes mécaniques et aux vibrations; leur protection contre les chocs correspondra à la classe IP 5 de la norme NFC 20.010 (applicable à la glace et aux parties métalliques) (30).

b) Résistance anti-corrosion

Les éléments constitutifs d'un appareil devront être particulièrement résistants à la corrosion, compte tenu de l'atmosphère très corrosive et humide existant en tunnel et en raison du nombre d'allumages et d'extinctions plus important qu'à l'air libre. Il devra en être de même pour les éléments extérieurs (visserie, fixation, chemins de câbles...). On emploiera généralement des alliages d'aluminium traités.

c) Etanchéité

Les appareils devront répondre à la classe IP 65 de la norme C 20.010 pour l'étanchéité aux poussières et à l'eau; toutefois, dans le cas d'un entretien régulièrement effectué, on peut éventuellement retenir la classe IP 55.

d) Vieillessement des joints

Le projeteur attirera l'attention des concurrents (et leur demandera des justifications) sur la conservation des qualités des joints au vieillissement, tant en ce qui concerne les joints permanents (liaison glace-appareil) que les joints des parties démontables par exemple pour le changement des lampes (dispositif de compensation de serrage).

4.1.2.3. *Prescriptions électriques*

a) L'ensemble des matériaux, matériels et appareillages de toute nature devront satisfaire aux normes AFNOR, aux prescriptions ou normes UTE et EDF. On notera en particulier les textes suivants :

Tableaux généraux BT "Éclairage - Signalisation et auxiliaires"

- Norme NFC 12.100 – Textes officiels relatifs à la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques (31).

Transformateurs

- Normes de la série NFC 52 – Transformateurs et accessoires (32).

Tableaux

- Toutes les normes sur le petit matériel BT.

Onduleur

- Décision n° A7.80 du GPEM/ME – Spécifications techniques relatives à la fourniture d'onduleurs autocommutés (33).

Batteries stationnaires

- Norme NFC 58.400 – Batteries stationnaires au plomb (34).

Redresseur

- Norme NFC 53.220 – Convertisseurs à semi-conducteurs (35).
- Norme NFC 53.221 – Convertisseurs autocommutés à semi-conducteurs (36).
- Décisions n° A1 et A2 du GPEM/ME – Redresseurs (37).

Groupes électrogènes

- Normes de la série NFC 51 sur les machines électriques tournantes (38).

Sources lumineuses

- Norme NFC 72.210 – Lampes tubulaires à fluorescence pour l'éclairage général (39).
- Norme NFC 72.211 – Lampes à vapeur de sodium basse pression (40).
- Norme NFC 71.214 – Accessoires de lampes tubulaires à fluorescence (41).
- Norme NFC 71.222 – Ballasts de type inductifs pour lampes à vapeur de sodium basse pression (42).
- Recommandation B2.78 du GPEM/ME – Fourniture des lampes à incandescence et tubes fluorescents destinés à l'éclairage intérieur (43).

Appareils d'éclairage

- Norme NFC 71.110 – Appareils d'éclairage électrique (28).
- Norme NFC 71.120 – Méthodes recommandées pour la photométrie des lampes et des appareils d'éclairage (44).
- Norme NFC 20.010 – Classification des degrés de protection procurés par les enveloppes (30).

Câbles MT

- Norme EDF HN 33.S22 – Câble moyenne tension à isolation synthétique extrudée (45).

Câble pour comptage

- Norme EDF HN 14.S40 – Spécification technique applicable aux installations de comptage des fournitures aux abonnés HT (46).

Câble d'alimentation électrique BT

- Conformité aux normes NF de la série C.32 (47). Les câbles seront en général du type U 1000 RO 2V pour l'alimentation fixe et SC12N pour les cordons secondaires.

Câble résistant au feu pour circuit secouru

- Norme NFC 32.070 – Essais de classification des conducteurs et câbles du point de vue de leur comportement au feu (essai CR.1) (48).
- Les boîtes de dérivation correspondantes, non visées par cette norme devront présenter le même comportement.

b) L'installation devra être conforme aux règles de l'art et respecter les prescriptions des normes et règlements en vigueur en particulier :

NFC 13.100 Postes de livraison... (49) ;

NFC 13.200 Installations électriques à haute tension. Règles (50) ;

NFC 15.100 Installations électriques à basse tension. Règles (51).

Décret du 14.11.62 concernant la protection des travailleurs (52).

c) Recommandations particulières

Régime de neutre : Afin d'améliorer la sélectivité en cas de défaut (en particulier, protection contre les contacts indirects), on retiendra chaque fois qu'il sera possible le régime TN (mise au neutre des masses), le régime I.T. (neutre isolé) bien que très satisfaisant conduit généralement à des sections de câbles supérieures, le régime T.T. (mise à la terre du neutre) ne permet pas d'assurer la sélectivité (protection contre les contacts indirects) en particulier sur les circuits d'éclairage résistant au feu alimentés par onduleur.

Calcul des câbles : Les câbles seront calculés en intensité, chute de tension, contacts indirects conformément à la norme NFC 15.100. Il conviendra en particulier de bien vérifier les conditions d'élimination des contacts indirects (suivant régime de neutre retenu), les chutes de tension admissibles entre le tableau BT et l'extrémité des circuits seront prises égales ou inférieures à 3% de la tension nominale.

Raccordement des appareils : D'une façon générale les appareils seront munis d'une prise d'alimentation électrique (prise mâle) permettant le raccordement direct aux prises prévues sur les boîtes de dérivation (prise femelle).

Les fusibles de protection des dérivations des circuits résistant au feu seront obligatoirement placés dans les boîtes de dérivation. L'ensemble des appareils sera relié au réseau de terre du tunnel.

d) Les puissances mises en jeu devront faire l'objet de prescriptions impératives, étant donné les dépenses d'énergie correspondantes, pour les sources et surtout pour les appareillages; l'attention des concurrents devra être attirée sur l'intérêt d'utiliser, à qualités techniques égales, des appareillages à faible consommation d'énergie, même si leur prix unitaire s'avère un peu plus élevé.

e) La chaleur dégagée par les sources et accessoires ne devra pas nuire à la filerie interne et aux divers organes de l'appareil; les concurrents devront tenir compte d'une température ambiante de + 35°C, les échauffements ne devant pas dépasser les limites indiquées dans le tableau II de la norme C 71.110 (28).

4.1.2.4. Prescriptions photométriques

Les concurrents doivent faire une étude photométrique conduisant à leur solution (appareils utilisés pour obtenir les niveaux d'éclairage et les uniformités définis dans le Dossier de Consultation des Entreprises).

a) Niveaux d'éclairage

● Les niveaux requis devront s'entendre après 1500 heures de fonctionnement des sources dans les conditions normales du tunnel.

Aussi, dans leurs offres, les concurrents devront indiquer :

- Le coefficient de dépréciation des sources en fonction du temps;
- Le coefficient de température.

Ils devront également tenir compte d'un coefficient d'absorption dû aux salissures, qu'on leur indiquera devoir être pris égal à 20% à 1500 heures.

● On veillera à ce qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur les niveaux à respecter, notamment en précisant la largeur à éclairer ainsi que le niveau recherché à la base des piédroits, et ce, à tous les régimes de fonctionnement qui auront été prévus.

En particulier, on veillera à bien préciser, dans le cas d'appareils équipés de plusieurs sources, si les régimes intermédiaires seront obtenus en éteignant une partie des sources situées dans un même appareil ou en éteignant une partie des appareils.

b) Coefficients d'uniformité

Il est nécessaire de prévoir des coefficients d'uniformité pour la section courante afin d'éviter les taches d'ombres sur la chaussée.

On distingue :

- L'uniformité transversale 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 qui est le rapport de deux valeurs mesurées sur l'axe de la chaussée, l'une dans l'axe d'un appareil, l'autre entre deux appareils consécutifs.

Au contraire de l'éclairage public, on peut considérer que les coefficients d'uniformité d'éclairement sont assez bien représentatifs de l'impression visuelle de l'utilisateur en raison de la proximité des sources, de leur caractère non ponctuel et des hauts niveaux employés.

Les valeurs à retenir sont les suivantes :

- Uniformité longitudinale :
 - régimes jour 0,8;
 - régimes nuit 0,6.
- Uniformité transversale :
 - régimes jour 0,7;
 - régimes nuit 0,5.

c) Sources lumineuses

Outre le fait que les sources employées (y compris douilles, culots, et tension d'alimentation) devront être d'un type couramment employé en France, étant donné les réapprovisionnements nécessaires, les concurrents devront fournir :

- La courbe de chute de flux en fonction du temps, la valeur résiduelle en fin de durée de service normal ne devant pas être inférieure à 70% de la valeur nominale dans les conditions normales d'utilisation.
- La courbe de chute de flux en fonction de la température ambiante du tunnel.
- La courbe de mortalité.

d) Appareils d'éclairage

Il sera souvent intéressant pour le Maître d'Ouvrage de disposer de la courbe de distribution du flux des lampes, une fois placées dans les appareils correspondants ; cette courbe photométrique présentée pour les différents types de sources et d'appareils, ne doit pas être considérée comme contractuelle ; elle peut apporter des éléments utiles de jugement.

e) Eblouissement

Dans le cas d'utilisation de sources très ponctuelles, comme les sources à vapeur de sodium haute pression, les concurrents doivent vérifier le non éblouissement des usagers ; en particulier, les brûleurs des sources devront être défilés, aucune réflexion spéculaire directe ne devant être visible au niveau des usagers ; de plus, les intensités des parties visibles devront être limitées.

4.1.2.5. Prescriptions géométriques

Les dimensions maximales des appareils, y compris leur système de fixation et les chemins de câbles, devront être soigneusement définies à l'appel d'offres ; ces contraintes pourront conduire à éliminer certains appareils dans certains cas.

4.1.2.6. Essais de réception

Il ressort de ce qui précède, que les essais de réception devront être soigneusement définis au niveau du Dossier de Consultation des Entreprises, tant en ce qui concerne les essais en laboratoire que ceux effectués in situ.

a) Les essais en laboratoire concernent les appareils d'éclairage ; ils seront conduits en vue de s'assurer du respect des différentes prescriptions mécaniques et électriques indiquées ci-avant aux § 4.1.2.2. et 4.1.2.3.

- Le contrôle de la résistance mécanique des appareils, de leur protection contre les poussières et contre les jets d'eau sera effectué suivant les dispositions de la norme C 20.010. Concernant les essais contre les poussières il faut toutefois veiller à bien définir le poids et la nature des poussières en suspension ainsi que la durée de l'essai et le niveau de la dépréciation.

- Le contrôle des protections électriques (respect des normes AFNOR et UTE) ne requiert pas de prescriptions spéciales.

b) Les essais in situ concernent l'ensemble de l'installation et consistent en la vérification des performances optiques garanties par l'entreprise : niveaux d'éclairement sur la chaussée, coefficients d'uniformité, défilement des sources.

– Les niveaux moyens requis sont obtenus en relevant les éclairagements sur la chaussée sur deux lignes transversales situées l’une au niveau d’un appareil d’éclairage, l’autre entre deux appareils ; les points de mesure seront situés tous les mètres de part et d’autre de l’axe du tunnel ; on relèvera également le niveau d’éclairage vertical sur le piédroit à 1 mètre au-dessus de la chaussée. Ces mesures seront faites avec un luxmètre muni d’un dispositif de correction d’incidence, et ayant fait au préalable, l’objet d’un étalonnage par un organisme agréé.

– La détermination des coefficients d’uniformité d’éclairage sera effectuée à partir des niveaux obtenus ci-dessus et suivant la méthode procédant de leur définition (cf. 4.1.2.4.b ci-avant).

– Les clauses de non éblouissement des sources (cf. 4.1.2.4.e ci-avant) sont à définir à chaque projet en fonction de l’implantation et de la réalisation des appareils renfermant des sources sodium haute pression.

c) Tolérances

Dans les mesures concernant les niveaux et les coefficients d’uniformité, on tiendra compte, avant d’appliquer les pénalités pour insuffisance :

- De la précision des appareils de mesure ;
- D’une tolérance supplémentaire de 5 % pour les éclairagements et 10 % pour les uniformités.

4.1.3. *Clauses financières des Cahiers des Charges*

4.1.3.1. Au plan général, le but du présent chapitre n’est pas de proposer un modèle de C.C.A.P., mais d’attirer l’attention des projeteurs sur les précautions à prendre au niveau de la rédaction du Dossier de Consultation des Entreprises.

La règle générale est constituée par un marché à prix global et forfaitaire, appuyée sur une décomposition, en général limitée, des prix unitaires pour faire face aux modifications éventuelles en cours de chantier et pour faciliter la comparaison au niveau du jugement des offres.

4.1.3.2. La seule spécificité d’un marché d’éclairage, en particulier de tunnels, concerne les pénalités pour insuffisance qui, bien que rarement appliquées, constituent cependant une motivation importante.

Ces pénalités doivent être calculées afin de présenter un caractère suffisamment dissuasif.

a) Niveaux d’éclairage

Les niveaux garantis devront être réalisés avec une marge de tolérance de 5 % dans chacune des sections du tunnel. Au-delà de cette insuffisance de 5 %, la réfaction applicable à chaque zone sera calculée par la formule :

$$P_i = \left(0,95 - \frac{ER_i}{EG_i}\right) \times M_i$$

dans laquelle :

P_i est le montant de la réfaction applicable à la section,

ER_i est l’éclairage moyen réel de la section,

EG_i est l’éclairage moyen garanti de la section,

M_i est le montant de la prestation : fourniture du matériel de la section incriminée (appareils, sources, appareillages).

Au-delà de 20 % d’insuffisance, on refusera la fourniture en laissant cependant la possibilité au titulaire du marché d’exécuter les compléments ou adaptations nécessaires à l’obtention des niveaux requis.

b) Uniformités

Les uniformités garanties devront être obtenues avec une marge de tolérance de 10 % dans chacune des sections du tunnel. Au-delà de cette insuffisance de 10 %, la réfaction applicable à chaque zone sera calculée par la formule :

$$P_i = \left(0,90 - \frac{UR_i}{UG_i}\right) \times M_i$$

dans laquelle

Pi est le montant de la réfaction applicable à la section.

URi est l'uniformité (transversale ou longitudinale) réelle de la section.

UGi est l'uniformité (transversale ou longitudinale) garantie pour la section.

Mi est le montant de la prestation : fourniture du matériel de la section incriminée (appareils, sources, appareillages).

Au-delà de 30 % d'insuffisance, on refusera la fourniture en laissant cependant la possibilité au titulaire du marché d'exécuter les compléments ou adaptations nécessaires à l'obtention des niveaux requis.

4.1.3.3. On trouvera au § 3.3. les éléments permettant de préparer l'estimation de l'opération.

4.2. **JUGEMENT DES OFFRES**

Le jugement des offres constitue une étape, qui sans être fondamentalement différente pour la réalisation d'une installation d'éclairage de tunnel par rapport à une réalisation à l'air libre, présente toutefois un certain nombre de points particuliers qu'il convient de demander aux entreprises et de vérifier.

4.2.1. **Caractéristiques mécaniques**

● Pour chaque type d'enveloppe proposé :

– Demander un certificat d'un laboratoire autorisé (en règle générale LCIE-Laboratoire Central des Industries Electriques) concernant la résistance aux chocs et l'étanchéité à l'eau et aux poussières :

– Apprécier l'incidence éventuelle des lampes et appareillages qui y sont incorporés.

● Apprécier la fiabilité et la facilité du système d'ouverture des appareils, en fonction notamment des permanences des conditions d'étanchéité des joints (on préférera généralement la plus faible longueur possible de joints).

● Apprécier la fiabilité des systèmes de presse-étoupe.

● Apprécier les qualités des matériaux employés pour les différentes parties des appareils.

4.2.2. **Caractéristiques photométriques**

● Vérifier la conformité avec le C.C.T.P. du semis de points proposé dans l'étude photométrique.

● S'assurer que les niveaux annoncés tiennent compte des coefficients correcteurs; le cas échéant, en tenir compte dans l'homogénéisation des offres.

● Etudier les variantes proposées en tenant en particulier compte des dépenses d'exploitation (dépenses d'énergie et de renouvellement des sources);

● Procéder, en tant que de besoin, à des essais in situ afin de vérifier les indications données par les entreprises.

4.2.3. **Caractéristiques électriques**

● Vérifier les puissances électriques annoncées, en particulier pour les appareillages.

● Vérifier les plans de câblage et leur compatibilité avec l'obtention des différents régimes annoncés; s'assurer en particulier que les protections ont bien été prévues sur les coffrets de dérivation ou à l'intérieur des appareils.

● S'il s'agit d'appareillages prototypes, faire effectuer des essais en laboratoire.

CHAPITRE 5

EXPLOITATION

L'entretien de l'installation d'éclairage constitue la majeure partie de l'entretien des équipements d'un tunnel ; en effet, la quasi totalité des tunnels routiers est équipée en éclairage artificiel et l'entretien de l'éclairage constitue la base essentielle pour assurer dans le temps des conditions acceptables de sécurité pour les usagers.

Il convient donc que les projeteurs soient informés des nécessités de l'exploitation afin qu'ils en tiennent compte au niveau du projet.

On s'est limité, dans le présent Guide, à donner uniquement quelques indications générales. Le Centre d'Etudes des Tunnels a publié, en 1979 un Guide de l'entretien et l'installation d'éclairage dans les tunnels routiers (53) qui étudie, de manière beaucoup plus complète, cette question importante.

5.1. DEFINITION DE L'ENTRETIEN

L'entretien d'une installation d'éclairage comporte : le renouvellement des sources, le nettoyage des glaces des appareils et des piédroits du tunnel, l'entretien divers lié aux luminaires, l'entretien de l'alimentation électrique et des divers dispositifs de réduction de la lumière.

5.1.1. *Renouvellement des sources*

Le flux émis par les sources s'affaiblit avec le temps, lentement d'abord, puis brutalement ; l'exploitant doit suivre l'évolution des niveaux et décider du bon moment pour renouveler les sources.

5.1.2. *Nettoyage des luminaires*

Le flux sortant des appareils est influencé par les salissures qui se déposent sur les surfaces photométriques, c'est-à-dire les réflecteurs, les glaces, etc. Si l'étanchéité à la poussière du luminaire est satisfaisante, il ne s'agira que de nettoyer l'extérieur des glaces.

En l'absence d'entretien, la perte du flux résultant peut-être quasiment totale.

Le luminaire doit être conçu de telle façon que les nettoyages nécessaires puissent être effectués facilement. Les intervalles des nettoyages peuvent varier entre un et trois mois, bien que dans des conditions particulièrement difficiles des intervalles encore plus courts puissent être nécessaires. La procédure correspondante doit être établie et stipulée.

5.1.3. *Entretien divers concernant les luminaires*

Il concerne la vérification et le changement éventuel des pièces de fixation des appareils, du système de fermeture et des joints d'étanchéité, des appareillages et du petit matériel.

5.1.4. *Entretien de l'installation électrique liée à l'éclairage*

Il s'agit d'entretien classique dans les installations électriques, pouvant concerner, selon les cas, les armoires, les batteries d'accumulateurs, les chargeurs onduleurs, les groupes électrogènes, les gradateurs de puissance, les cellules de commande, les appareillages (ballasts, condensateurs), fusibles, etc.

5.1.5. *Paralumes* (lorsqu'il en existe)

Leur entretien comprend l'examen visuel annuel, leur nettoyage et la vérification de leur état mécanique, ainsi que la vérification de leur comportement en cas de fortes chutes de neige.

5.2. *INCIDENCES DE L'ENTRETIEN SUR LE PROJET*

Etant donné l'importance des tâches d'entretien, brièvement indiquées ci-avant, il est recommandé aux projeteurs de consulter au maximum les futurs exploitants des tunnels considérés, ou à défaut, les exploitants de tunnels semblables ; ces exploitants pourront faire connaître leur expérience personnelle, en particulier les suggestions suivantes seront examinées :

5.2.1. *Implantation des appareils*

Les appareils seront, autant que possible, disposés en deux files, de façon à ce que leur entretien ne nécessite pas la fermeture complète et systématique du tunnel ; dans le cas contraire, la file unique sera légèrement décalée par rapport à l'axe de la chaussée.

5.2.2. *Nettoyage du tunnel*

L'étanchéité des appareils vis-à-vis des poussières et de l'eau (lavage) sera assurée par une classification IP suffisante ; dans le cas de galeries spéciales d'éclairage, l'étanchéité de la paroi en verre dépoli devra être examinée.

5.2.3. *Entretien divers lié à l'appareil d'éclairage*

Cet entretien est facilité par des dispositions constructives simples et peu onéreuses, lorsqu'elles sont prévues à l'avance, telles que :

- Démontage rapide des pièces d'accès aux sources et appareillages ;
- Large dimensionnement du mode de fixation des appareils ;
- Bonne résistance à la corrosion des pièces constitutives des appareils et des matériaux divers dans le tunnel ;
- Implantation des appareils largement en dehors du gabarit de circulation (au moins 25 cm) ;
- Raccordements électriques du même degré d'étanchéité que les appareils.

En outre, on prévoira une quantité suffisante de pièces de rechange permettant la reconstitution d'environ 5 % d'appareils équipés.

5.2.4. *Entretien de l'installation électrique liée à l'éclairage*

De la même façon, cet entretien est facilité par :

- Un accès commode dans les locaux techniques ;
- Une disposition fonctionnelle des armoires de commande ;
- La possibilité d'isoler chaque départ de circuit ;
- Une double alimentation électrique.

5.2.5. *Paralumes*

Ils seront construits en matériaux résistant à la corrosion et au feu; leurs caractéristiques mécaniques devront tenir compte des surcharges résultant des effets du vent et des **accumulations** de neige; enfin, ils seront positionnés avec une revanche importante (plus de 50 cm) par rapport au gabarit routier.

5.3. *COÛT D'EXPLOITATION*

Le coût d'exploitation d'une installation d'éclairage est la somme des coûts de maintenance et de consommation électrique.

5.3.1. *Coût de maintenance*

Le coût de maintenance d'une installation d'éclairage est essentiellement composé du coût du renouvellement des sources et de celui du nettoyage des faces avant des appareils.

a) Renouvellement de sources

Le remplacement systématique est généralement préférable pour maintenir une qualité de service compatible avec les hypothèses retenues lors du projet (valeur du facteur de maintenance M comprise entre 0,72 et 0,77 suivant le type de source). Ce remplacement dépend évidemment de la durée de vie et du nombre d'heures et des conditions de fonctionnement des sources.

Ces derniers varient suivant le circuit auquel appartient la source (les lampes du circuit secouru fonctionnent 24 heures sur 24 mais ne subissent pas d'allumages répétés à l'inverse de celles du régime plein soleil par exemple).

Dans les tableaux qui suivent, une moyenne pour l'ensemble des sources du régime de base puis de la zone de renforcement a été retenue. Pour une étude plus fine adaptée à chaque cas particulier, un suivi de mesure d'éclairement et (ou) de flux avant et après nettoyage sur quelques appareils tests de chaque circuit permet d'établir les meilleures périodicités de nettoyage et de renouvellement des sources. La surveillance doit être vigilante à partir de 8000 heures de fonctionnement mais les durées de vie peuvent être plus longues.

Le coût intitulé renouvellement des sources dans le tableau ci-après comprend le coût des sources augmenté de celui de la main-d'œuvre et d'une majoration forfaitaire de 10 % pour la fourniture et le changement éventuel du ballast, de fusibles...

b) Nettoyage des faces avant des appareils d'éclairage

Sa fréquence varie évidemment avec les conditions d'encrassement du tunnel. Dans les tableaux ci-après on a considéré une moyenne de quatre nettoyages par an pour les tunnels non urbains et de un nettoyage par mois pour les tunnels urbains.

Le coût du nettoyage dépend évidemment des conditions dans lesquelles il est réalisé (travail en régie, intervention d'une entreprise spécialisée...).

On peut retenir une fourchette de l'ordre de 1,50 F par appareil et par nettoyage pour un tunnel urbain à 20 F par appareil par nettoyage pour un tunnel de montagne, ces prix étant donnés hors taxes aux conditions économiques de fin 1983.

5.3.2. *Coût de consommation électrique*

S'il est aisé, à partir du projet de prévoir la puissance totale appelée et donc, en fonction des temps de fonctionnement des différents régimes, l'énergie consommée en une année, il est plus délicat de préciser un prix global du kWh en raison des différences de tarification selon les heures de fonctionnement et le type de contrat du distributeur.

Une évaluation moyenne à partir des principaux tunnels français a conduit à la valeur de 0,40 F hors taxes (fin 1983).

5.3.3. Coût total d'exploitation

En relation avec le coût d'investissement (cf. § 3.3.), le tableau de la figure 103 représente le coût d'exploitation annuel par rapport au coût d'investissement exprimé en pourcentage aux conditions d'octobre 1983.

	Tunnel de montagne faiblement éclairé	Tunnel autoroutier ou de rase campagne	Tunnel urbain	
			Files discontinues	Files continues (bandeau)
Zone de section courante exploitation/ investissement (%)	NaBP 8 à 10	NaHP : 12 à 14 NaBP : 8 à 10	Fluo + NaBP 7 à 8	Fluo 4 à 5
Zone de renforcement exploitation/ investissement (%)	NaBP 4 à 5	NaHP 6 à 8	NaHP 8 à 10	NaHP 7 à 8

Fig. 103. – Coût d'exploitation annuel/coût de premier investissement (en % octobre 1983).

Le tableau de la figure 104 donne la répartition du coût d'exploitation en fonction du type de tunnel.

	Poste %	Tunnel de montagne faiblement éclairé	Tunnel autoroutier ou de rase campagne	Tunnel urbain	
				Files discontinues	Files continues
Zone de section courante	Energie électrique	40 à 50	60 à 70	75 à 85	80 à 90
	Renouvellement des sources	40 à 50	20 à 30	10 à 20	10 à 15
	Nettoyage	5 à 20	5 à 10	5 à 10	5 à 10
Zone de renforcement	Energie électrique	70 à 80	75 à 85	75 à 85	80 à 90
	Renouvellement des sources	15 à 25	10 à 20	10 à 20	10 à 15
	Nettoyage	10 à 15	5 à 10	5 à 10	5 à 10

Fig. 104. – Pourcentage du coût d'exploitation total pour l'énergie électrique, le renouvellement des sources et le nettoyage en fonction des différents types de tunnels.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 – M. NEBOIT
Vision, Exploration visuelle et sécurité routière
ONSER, Cahiers d'études – n° 54, juillet 1981, 55 p.
- 2 – K. NARISADA and K. YOSHIKAWA
Tunnel entrance lighting – Effect of fixation point and other factors on the determination of requirements.
Lighting Research and Technology, 1974, vol. 6, n° 1, pp 9-18.
- 3 – Commission Internationale de l'Eclairage
A Unified Framework of Methods for Evaluating Visual Performance Aspects of Lighting.
Publication C.I.E. n° 19 (TC-3.1) 1972.
- 4 – H.W. BODMANN
Visibility Assessment in Lighting Engineering
Journal of I.E.S. – July 1973, pp 437-444.
- 5 – W.E. KNOWLES MIDDLETON – Vision through the atmosphere
University of Toronto Press, 1958, p 90.
- 6 – I. OVERINGTON
Vision and acquisition
Pentech Press, Londres, 1976, p 49.
- 7 – K. NARISADA, T. TAKEUCHI and S. KOSAKO
Luminance measurements in the Access of Tunnels in Daytime... associated Errors
Matsushita Electric Industrial Co, Ltd – Moriguchi, Osaka, Japan – 570
Lighting Research Laboratory, march 1980.
- 8 – J.S. DUBUISSON
Essais de visibilité dans le tunnel du Mont Blanc
C.E.Tu., rapport interne, 1976.
- 9 – Direction des Routes et de la Circulation Routière
Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes nationales (I.C.T.A.R.N).
D.R.C.R., 1970, p 17.
- 10 – J.B. DE BOER
Le problème de l'éclairage de transition dans les entrées de tunnel. Communication présentée au Congrès de l'Association Italienne de l'Eclairage, Turin, mai 1961.
- 11 – Commission Internationale de l'Eclairage
Tunnel entrance lighting, a survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone.
Final draft of Sub committee 3, Tunnel lighting of TC-4.6 "Road Lighting" of C.I.E. – avril 1983, 80 p.
- 12 – Association Française de l'Eclairage
Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques – 5^e édition, novembre 1978.
- 13 – J. VALIN
Influence de la luminance moyenne des chaussées en éclairage public sur la perception des obstacles... et sur la sécurité.
LUX n° 113, juin 1981, pp 37-44.
- 14 – F.C. SMITH
Trans I.E.S. 3, 12, 196 (1938).
- 15 – E.R. HANSEN – J.S. LARSEN
Reflection factors for pedestrian's clothing
Lighting Research and Technology. Vol. 11 n° 3/1979, pp 154-157.

- 16 – P. BLASER
Die Gegenstrahlbeleuchtung in der einfahrzone von Strassentunneln
Bulletin SEV/VSE, 1981, n° 17, pp 991-996.
- 17 – D.A. SCHREUDER
L'éclairage des tunnels routiers
N.V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1964.
- 18 – O.M. BLACKWELL, H.R. BLACKWELL
Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Varying Age
Report to the Illuminating Engineering Research Institute Ohio State University,
Colombus, Ohio, 1970.
- 19 – J.S. DUBUISSON
Vision des détails et des contrastes dans le tunnel du Mont-Blanc en section courante.
C.E.Tu., Rapport interne, 1974.
- 20 – F. NAKAMICHI – K. NARISADA – K. YOSHIKAWA
Experiment on the Visibility of the Tunnel Entrance Lighting
J. Illum. Engng. Inst. Jpn., 1967, vol. 51, n° 9, pp 566-581.
- 21 – K. NARISADA
Latest Research in Tunnel Lighting in Japan
Highway Research Circular, 1972, n° 137, pp 9-27.
- 22 – K. NARISADA
Applied Research on Tunnel Entrance Lighting in Japan.
Lighting Research and Technology, 1975, vol. 7, n° 2, pp 87-90.
- 23 – Association Internationale Permanente des Congrès de la Route, Comité Technique
des tunnels routiers.
Rapport XVII^e Congrès mondial de la Route, Sydney, octobre 1983.
- 24 – Le marquage routier en tunnel – Guide Technique – C.E.Tu. février 1982.
- 25 – G. ACHARD
Mesure des caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée et étude
des luminances des voies de circulation.
Thèse Doct. Ing., I.N.S.A. de Lyon, 1976, 200 p.
- 26 – Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation et Ministère des Transports.
Circulaire n° 81-109 du 29 décembre 1981 relative à la sécurité dans les tunnels
routiers.
- 27 – Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie et Ministère des Transports.
Circulaire n° 81-23-3/5 du 25 mars 1981 relative aux modalités d'établissement
et d'instruction des dossiers techniques concernant les opérations d'investissements
routiers.
Bulletin officiel, fascicule spécial 81-14 bis.
- 28 – AFNOR
Appareils d'éclairage électrique – Règles.
Norme NFC 71.110 : février 1981.
- 29 – Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I.).
Luminaires 1^{re} partie règles générales et généralités sur les essais.
Norme C.E.I. 598-1 : 1979 – modifiée 1982.
- 30 – AFNOR
Règles communes aux matériels électriques – Classification des degrés de protection
procurés par les enveloppes.
Norme NFC 20.010 : avril 1977.
- 31 – AFNOR
Textes officiels relatifs à la protection des travailleurs dans les établissements qui
mettent en œuvre des courants électriques.
Norme NFC 12.100 : mars 1978.
- 32 – AFNOR
Transformateurs.
Normes de la série NFC 52.

- 33 – GPEM/ME
Fourniture d'ondulateurs autocommutés. Spécifications techniques.
Décision n° A7.80. Brochure Journal Officiel n° 35643.
- 34 – AFNOR
Batteries stationnaires d'accumulateurs au plomb type "Plante" – Règles.
Norme NFC 58.400 : juillet 1966.
- 35 – AFNOR
Convertisseurs à semi-conducteurs.
Norme NFC 53.220 : avril 1975.
- 36 – AFNOR
Convertisseurs autocommutés à semi-conducteurs.
Norme NFC 53.221 : décembre 1980.
- 37 – GPEM/ME
Redresseurs.
Décisions n° A1 et A2. Brochure Journal Officiel n° 35640.
- 38 – AFNOR
Machines électriques tournantes.
Normes de la série NFC 51.
- 39 – AFNOR
Lampes tubulaires à fluorescence pour l'éclairage général.
Norme NFC 72.210 : octobre 1981.
- 40 – AFNOR
Lampes à vapeur de sodium à basse pression.
Norme NFC 72.211 : octobre 1980.
- 41 – AFNOR
Accessoires de lampes tubulaires à fluorescence – Starters pour lampes tubulaires à fluorescence.
Norme NFC 71.214 : mars 1975.
- 42 – AFNOR
Accessoires de lampes à décharge – Ballasts pour lampes à vapeur de sodium basse pression.
Norme NFC 71.222 : octobre 1981.
- 43 – GPEM/ME
Cahiers des clauses particulières types pour la fourniture de lampes électriques à incandescence et de lampes tubulaires à fluorescence (éclairage intérieur).
Recommandations B2.78 – Brochure Journal Officiel n° 35650.
- 44 – AFNOR
Méthodes recommandées pour la photométrie des lampes et des appareils d'éclairage.
Norme NFC 71.120 : janvier 1970.
- 45 – Electricité de France
Câble moyenne tension à isolation synthétique extrudée.
Norme EDF HN 33.S22 : mars 1971.
- 46 – Electricité de France
Spécification technique applicable aux installations de comptage des fournitures aux abonnés HT
Norme EDF HN 14.S 40 : mai 1963.
- 47 – AFNOR
Conducteurs et câbles isolés pour installations et équipements.
Normes de la série NFC 32.
- 48 – AFNOR
Essais de classification des conducteurs et câbles du point de vue de leur comportement au feu.
Norme NFC 32.070 : juin 1979.

- 49 – AFNOR
Postes de livraison établis à l'intérieur d'un bâtiment et alimentés par un réseau de distribution publique de deuxième catégorie.
Norme NFC 13.100 : juillet 1981.
- 50 – AFNOR
Installations électriques à haute tension – Règles.
Norme NFC 13.200 : décembre 1974.
- 51 – AFNOR
Installations électriques à basse tension – Règles.
Norme NFC 15.100 : février 1981.
- 52 – Décret n° 62-1454 du 14 novembre 1962 relatif à la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.
Journal Officiel du 5 décembre 1962.
- 53 – Guide de l'entretien de l'installation d'éclairage dans les tunnels routiers.
C.E.Tu. – juin 1979.

ANNEXE 1

SOURCES LUMINEUSES

1. – DIFFERENTS TYPES DE SOURCES UTILISES

Trois principaux types de lampes à décharge sont actuellement utilisés pour assurer l'éclairage des tunnels routiers. Il s'agit :

- Des tubes fluorescents ;
- Des lampes à vapeur de sodium basse pression ;
- Des lampes à vapeur de sodium haute pression.

Les caractéristiques fournies dans la présente annexe peuvent être sujettes à variation et ne sont données qu'à **titre indicatif**. Il conviendra de se les faire préciser au moment des appels d'offres ou auprès des constructeurs.

2. – TUBES FLUORESCENTS

2.1. Principe général

Le tube fluorescent est une lampe à décharge à vapeur de mercure. La décharge électrique provoque une excitation qui émet un rayonnement ultraviolet. Le tube en verre est recouvert intérieurement d'une couche de poudre fluorescente qui transforme le rayonnement ultraviolet en rayonnement de plus grande longueur d'onde, donc en lumière visible.

La couleur de la lumière, ou plus précisément sa composition spectrale, dépend de la nature de la poudre ou des poudres qui agissent comme des transformateurs de fréquence.

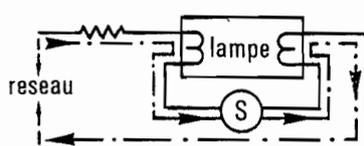
Les différents perfectionnements ont eu pour effet d'accroître la quantité et aussi la qualité de la lumière blanche émise, afin d'avoir un rendu des couleurs aussi bon que possible (indice I.R.C.) ou alors de privilégier certaines longueurs d'onde.

Pour les tunnels, les tubes Ø 26 mm 36 W et 58 W ont complètement remplacé les tubes Ø 38 mm, 40 W et 65 W.

2.2. Amorçage

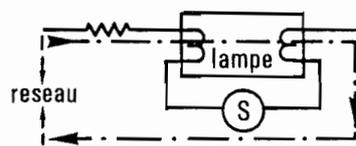
Pour favoriser l'amorçage de la lampe, on est conduit à utiliser des moyens additionnels. Le principe retenu est le suivant :

Une surtension est provoquée par la coupure brusque d'un circuit selfique, la rupture étant assurée par un dispositif appelé starter, petit tube à décharge à l'argon comportant un bilame qui se déforme sous l'effet de la chaleur. Quelques secondes sont nécessaires pour assurer l'amorçage de la lampe.



A L'AMORCAGE

La période de préchauffage des électrodes est assurée pendant le temps où le starter est fermé.



EN FONCTIONNEMENT

La surtension d'amorçage est appliquée aux bornes de la lampe, à l'ouverture du starter.

2.3. Ballasts

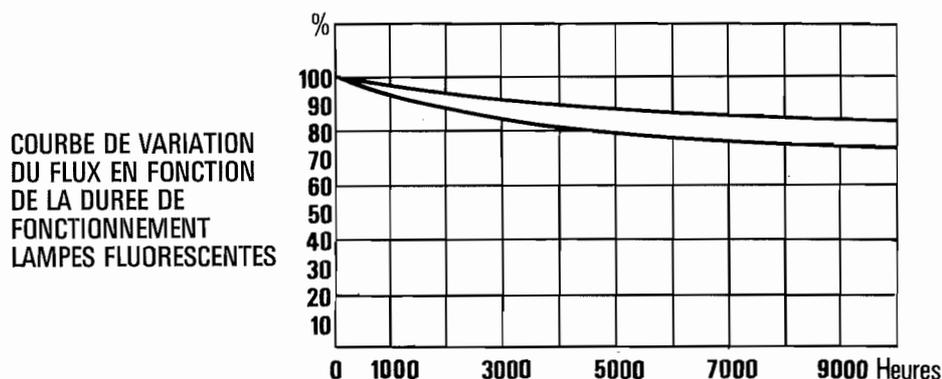
Une fois l'amorçage effectué, la résistance du gaz à l'intérieur du tube va en décroissant, et il convient de contrôler et de stabiliser ce phénomène par une self (couramment dénommée ballast) montée en série dont l'un des rôles est de limiter le courant à la valeur visée pour la lampe. Il convient également de relever le facteur de puissance de l'installation par un condensateur en parallèle ou en série.

La puissance de cet appareillage (ballast + condensateur) est de 9 W à 16 W environ, puissance qu'il convient de rajouter à la puissance unitaire des lampes.

2.4. Variation du flux lumineux

a) En fonction de la durée de fonctionnement

A chaque allumage, l'arrachement de particules aux cathodes entraîne un noircissement du tube, absorbant le flux lumineux. En outre, le vieillissement des poudres, provoque une diminution progressive du flux lumineux. On trouvera ci-après, à titre d'indication, la courbe de variation du flux lumineux en fonction de la durée de fonctionnement.

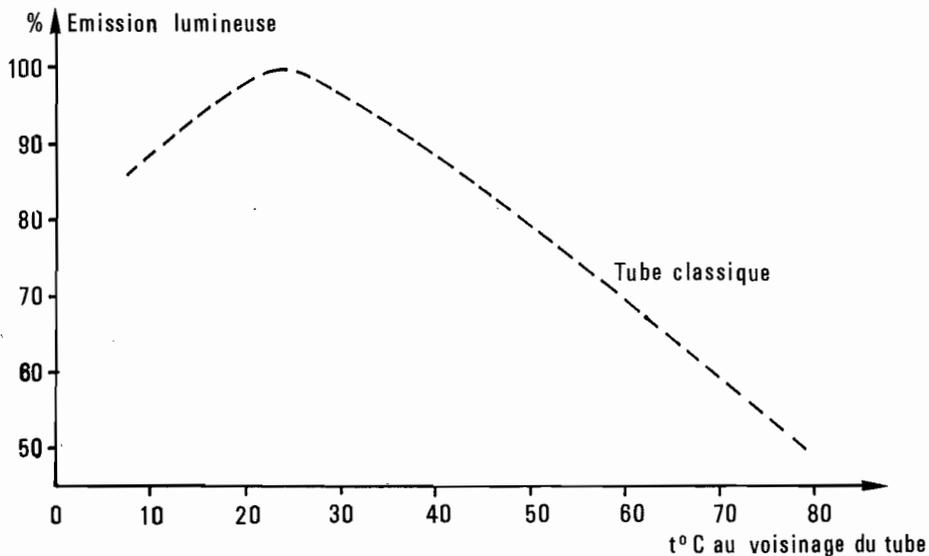


b) En fonction de la température

Le tube fluorescent est relativement sensible aux variations de température.

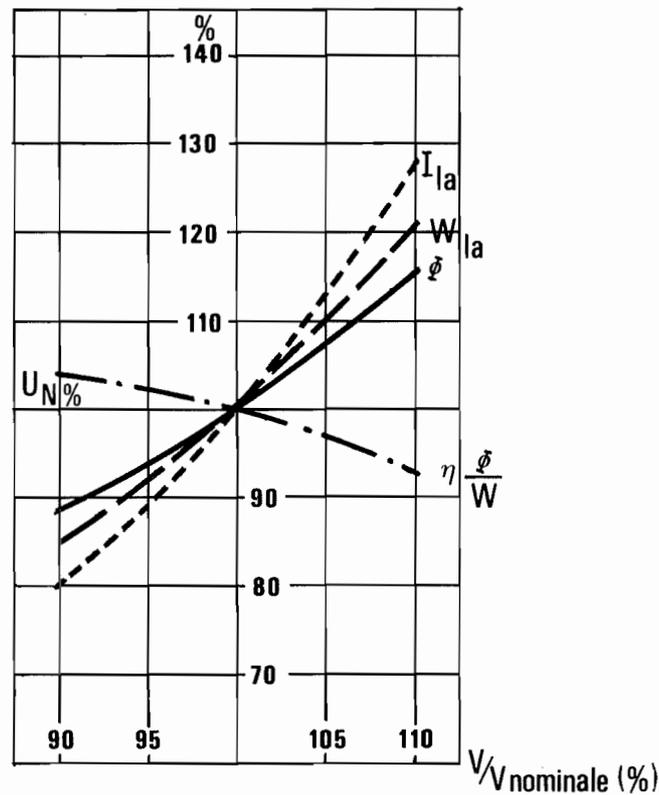
L'efficacité lumineuse du tube est maximale lorsque l'air ambiant est à 25°C. A 50°C, la perte du flux lumineux est d'environ 20%.

On trouvera ci-après, à titre indicatif, la variation du flux lumineux en fonction de la température.



c) En fonction de la tension

On trouvera ci-après, à titre indicatif, sur un circuit selfique la variation du flux lumineux, de l'intensité, de la puissance et de l'efficacité en fonction de la tension d'alimentation.



2.5. Domaine d'emploi, avantages et inconvénients

a) Le tube fluorescent est uniquement réservé à la réalisation des niveaux d'éclairage en section courante.

b) Les principaux avantages du tube fluorescent résident dans :

- Sa luminance relativement faible qui écarte tout risque d'éblouissement ;
- Son rendu des couleurs ;
- Sa longue durée de vie ;
- Sa forme linéaire et son flux lumineux relativement modéré qui permettent de réaliser des lignes continues et un bon guidage visuel ;
- Son faible coût unitaire ;
- La possibilité de rallumage et allumage presque instantané intéressante pour la sécurité ;

c) Parmi les inconvénients, on pourra citer :

- Une efficacité lumineuse relativement moins élevée que pour d'autres sources ;
- Un flux lumineux unitaire modéré qui ne permet pas d'obtenir de hauts niveaux d'éclairage (ou des niveaux moyens pour des ouvrages très larges) autrement qu'en multipliant le nombre de sources et d'appareils ;
- Ses dimensions ; l'appareil associé est relativement long par rapport aux appareils à sources ponctuelles, occasionnant ainsi un coût de premier investissement plus élevé.

3. – LAMPES A VAPEUR DE SODIUM BASSE PRESSION

3.1. Principe général

Ce type de source qui est aussi une lampe à décharge, fait appel à l'émission spectrale de la décharge électrique dans une atmosphère de vapeur de sodium à basse pression.

Le tube à décharge en forme de U est rempli de gaz rare (néon, argon...) à basse pression et il contient du sodium qui à froid est condensé en gouttelettes brillantes dans des bossages implantés tout au long du tube. Ce tube est logé dans une ampoule cylindrique.

La décharge s'amorce dans le néon, puis sous l'effet de la chaleur, le sodium se volatilise. La décharge s'établit alors dans la vapeur de sodium à basse pression.

En fonctionnement près de 95 % du rayonnement est fourni sur deux longueurs d'ondes d'un doublet du sodium (589 nm et 589,6 nm) qui sont voisines de la sensibilité maximale de l'œil (555 nm en vision photopique). Le rayonnement obtenu, jaune orangé, pratiquement monochromatique, permet ainsi d'atteindre une efficacité lumineuse très élevée.

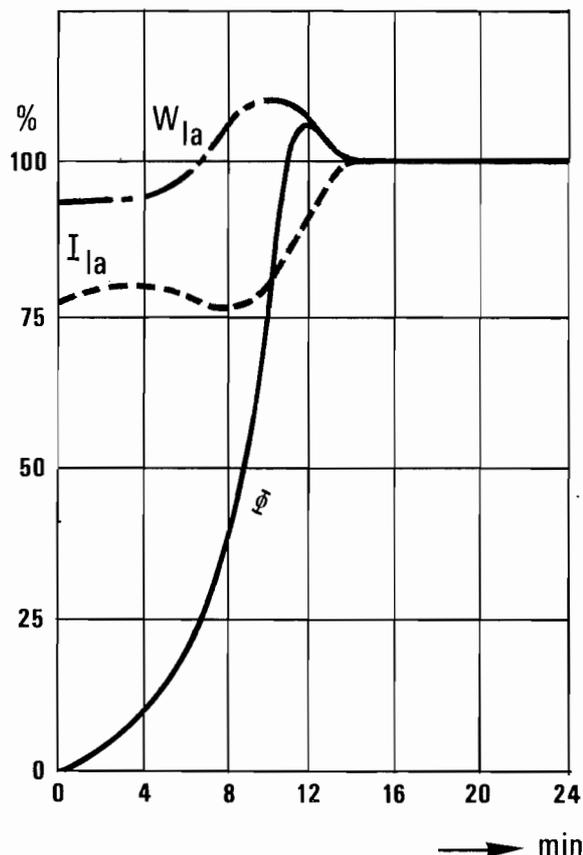
3.2. Amorçage

Comme nous l'avons vu précédemment, l'amorçage se fait à froid dans le néon et le régime s'établit ensuite progressivement dans le sodium volatilisé.

On conçoit donc aisément que dans ces conditions, la mise en régime de la source soit relativement longue.

On trouvera, ci-après, à titre indicatif la variation des caractéristiques pendant un amorçage à froid.

VARIATION DES CARACTERISTIQUES
PENDANT L'AMORÇAGE



Jusqu'à présent, les lampes à vapeur de sodium basse pression ne se rallumaient pas instantanément après une courte extinction et il convenait d'attendre le temps nécessaire à la condensation d'une partie du sodium (par refroidissement).

Le développement de la technique en matière d'appareillage et notamment de l'introduction dans le circuit d'alimentation d'un amorceur, permet actuellement de supprimer cet inconvénient. La source se rallume sous l'effet d'un pic de tension suffisamment important qui permet de vaincre la résistance interne de la source à chaud.

3.3. Ballasts

Les lampes à vapeur de sodium basse pression sont obligatoirement raccordées au réseau par l'intermédiaire d'un appareillage d'alimentation, dont le rôle est de stabiliser la décharge en limitant l'intensité du courant tout en assurant le débit correspondant à la puissance en watts pour laquelle la lampe a été conçue.

Cet appareillage peut être soit une self soit un autotransformateur.

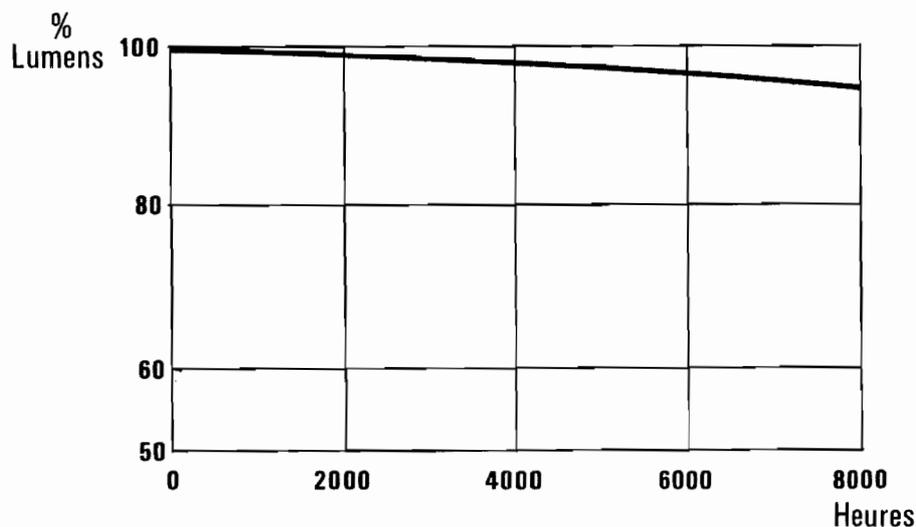
L'évolution de ces matériels tend à diminuer la consommation propre à l'appareillage (d'où un rapport lumens/watt encore plus intéressant) et à permettre le rallumage à chaud et instantané des lampes à vapeur de sodium basse pression.

A cet appareillage, il convient éventuellement d'adjoindre un ou plusieurs condensateurs de manière à relever le facteur de puissance.

3.4. Variation du flux lumineux

a) En fonction de la durée de fonctionnement

Les lampes à vapeur de sodium basse pression s'autorégulent et de ce fait l'influence de la durée de fonctionnement est relativement peu importante comme on peut le voir sur la courbe type ci-dessous.



b) En fonction de la température

La température n'a pas d'influence sur le fonctionnement de la source car le tube à décharge en U est enfermé dans une enveloppe revêtue d'une couche réfléchissante d'oxyde d'indium, dans laquelle on a fait le vide. Ces dispositions limitent très fortement les échanges thermiques et assurent ainsi un excellent équilibre.

3.5. Domaine d'emploi, avantages et inconvénients

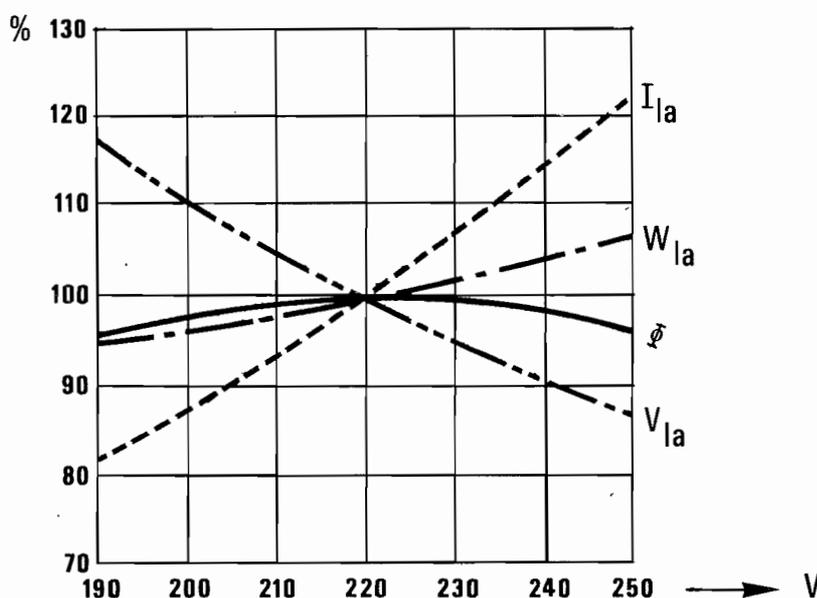
a) Grâce à sa large gamme de puissances et de flux lumineux (de 4 800 à 33 000 lumens), la lampe à vapeur de sodium peut être utilisée tant pour les besoins de section courante que pour la réalisation des renforcements d'entrée. De plus, l'évolution de la technique en matière de rallumage à chaud permet d'utiliser sans problème ces sources en section courante.

b) Positions de fonctionnement

Certaines de ces lampes ne fonctionnent qu'en position voisine de l'horizontale pour assurer la répartition du sodium à l'intérieur du tube.

c) Variation des caractéristiques en fonction de la tension

On trouvera ci-après, à titre indicatif, la variation des caractéristiques en fonction de la tension d'alimentation.



d) Les principaux avantages des lampes à vapeur de sodium basse pression sont les suivants :

- Du fait du rayonnement monochromatique, la faculté d'accommodation, la netteté et la rapidité de perception, l'acuité visuelle et le contraste sont augmentés. On trouvera d'ailleurs en 3.6. un développement plus complet à ce sujet;
- L'efficacité lumineuse est la meilleure de toutes les sources utilisées tant en éclairage tunnel qu'en éclairage public, ce qui est intéressant pour les économies d'énergie et les dépenses d'exploitation;
- La luminance propre de la source est peu importante, il n'y a donc pas de risque d'éblouissement;
- La durée de vie est relativement élevée;
- La gamme de puissance étendue permet une adaptation à tous les régimes d'éclairage souhaités pour l'éclairage des tunnels;
- La longueur des appareils (donc leur coût) est réduite par rapport aux luminaires pour tube fluorescent.

e) Les principaux inconvénients de cette source :

- Du fait du rayonnement monochromatique, les couleurs autres que le jaune sont d'un aspect grisâtre peu esthétique;
- Le coût unitaire élevé des sources (du moins par comparaison avec le tube fluorescent);
- Le temps d'amorçage de la source qui est relativement long;
- Le rallumage non instantané si l'on n'utilise pas des appareillages appropriés.

3.6. Effets du rayonnement monochromatique

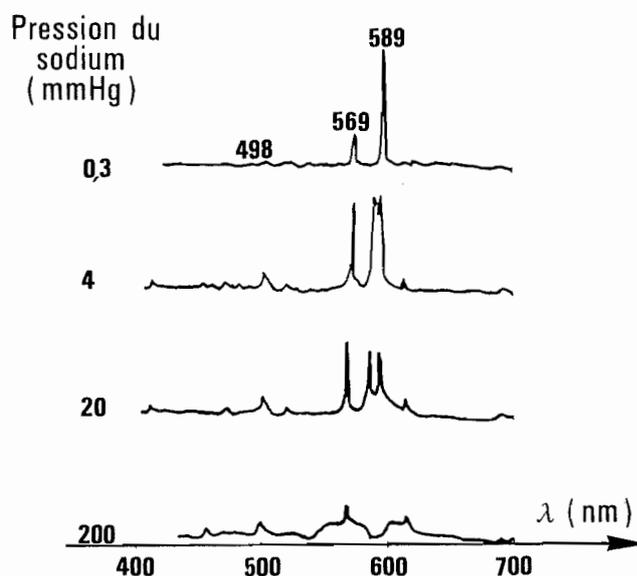
Ce rayonnement monochromatique situé sur une longueur d'onde proche de la sensibilité maximale de l'œil, entraîne pour ce dernier les effets suivants :

- La lumière monochromatique supprime les aberrations. **La faculté d'accommodation** est donc notablement augmentée. Ceci évite une fatigue de l'œil, l'accommodation se traduisant par une variation de la courbure du cristallin.
- L'œil "met au point" naturellement sur la longueur d'onde correspondant à sa sensibilité maximale soit sur la couleur jaune. L'avantage du doublet 589 nm – 589,6 nm paraît donc évident en ce qui concerne la **netteté de perception**.
- Il y a une augmentation notable de la **rapidité de perception** en lumière jaune par rapport à celle observée en lumière blanche. Divers essais effectués avec des niveaux de luminance relativement faibles ont montré que cette rapidité de perception peut être 3 à 4 fois plus grande si on utilise un éclairage sodium basse pression.
- Augmentation également de l'**acuité visuelle**. Elle est maximale pour 555 nm ; dans le cas du rayonnement produit par une lampe à vapeur de sodium à basse pression elle est plus de quatre fois supérieure à la perception en lumière blanche obtenue à partir du spectre continu.
- Le rayonnement monochromatique jaune est peu sensible au milieu ambiant et la présence de pluie, de brouillard ou de particules de fumées influe peu sur la propagation de la lumière. La visibilité en **atmosphère non limpide** est donc très supérieure à celle obtenue en lumière blanche (spectre continu), et le sodium basse pression est de ce fait fréquemment utilisé dans les ports, sur les voies fluviales, les écluses par exemple et dans les industries chimiques.

4. – LAMPES A VAPEUR DE SODIUM HAUTE PRESSION

4.1. Principe général

La lampe à vapeur de sodium haute pression est une lampe à décharge qui renferme un amalgame de sodium et de mercure, en même temps qu'un ou des gaz rares (Xénon ou autre) introduit sous faible pression dans un tube à décharge de petit diamètre en alumine translucide qui résiste à l'agressivité chimique du sodium à très haute température. En élevant la température (par rapport au sodium basse pression) on augmente considérablement la pression de la vapeur de sodium et il en résulte un élargissement du spectre lumineux avec comme conséquence une amélioration de la couleur qui n'est plus alors uniquement celle du doublet du sodium basse pression.

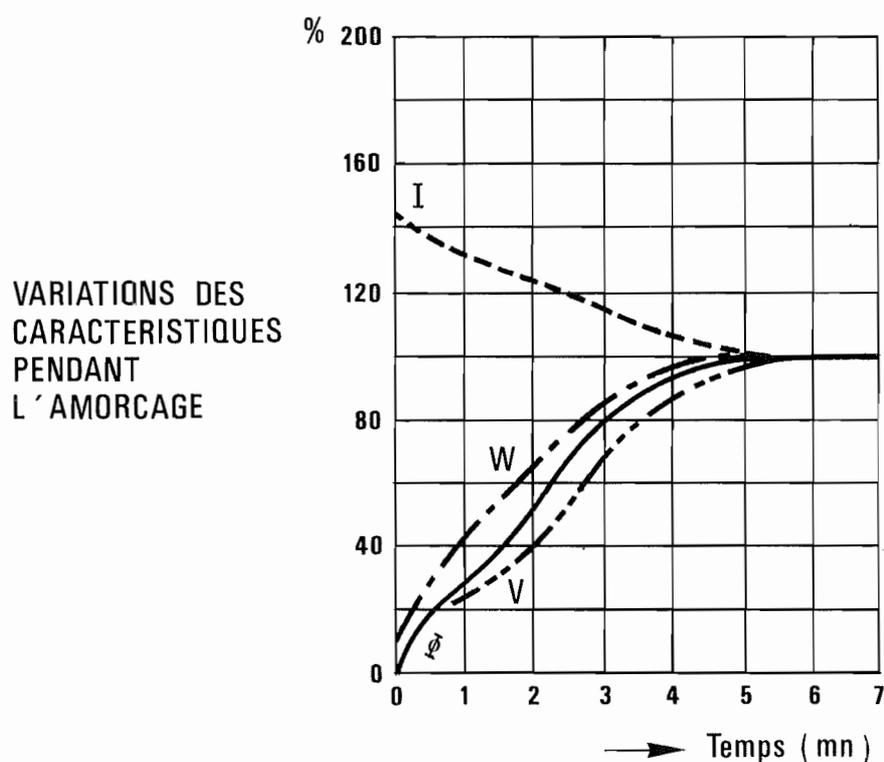


ELARGISSEMENT DU DOUBLET DE SODIUM
LORSQUE LA PRESSION PARTIELLE AUGMENTE

La pression en fonctionnement régnant à l'intérieur du tube à décharge est d'environ 300 mm Hg ; les températures sont de 700 à 800° C aux extrémités et 1 200° C au centre. Le résultat en est une couleur blanc doré.

4.2. Amorçage

La décharge initiale provoquée par un amorceur (tension de crête de l'ordre de 2 500 V) s'effectue dans le gaz rare et la dissipation de chaleur qui en résulte provoque l'évaporation d'une partie de l'amalgame. Les vapeurs de sodium et de mercure assurent alors la décharge. Le temps d'amorçage est relativement moins long que celui des lampes sodium basse pression. On trouve ci-après la variation des caractéristiques pendant l'amorçage.



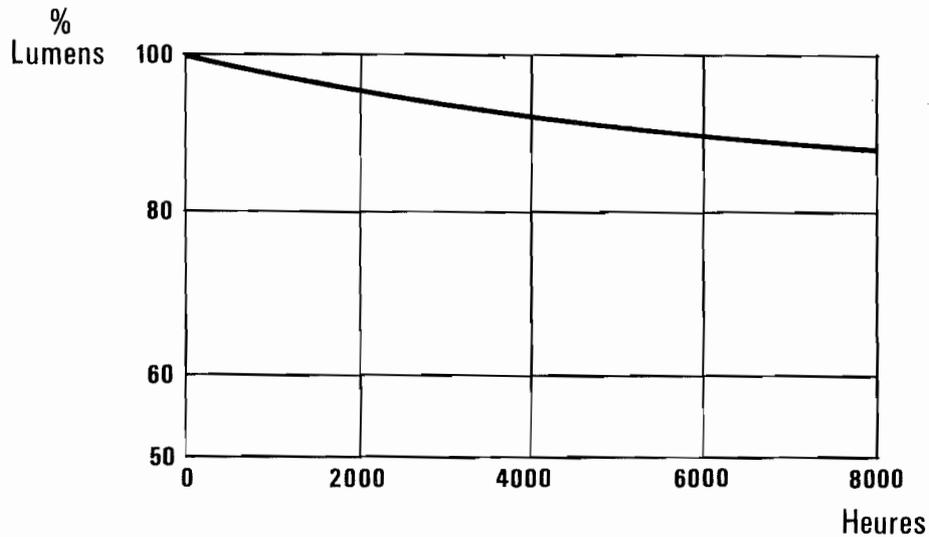
Par contre, en cas d'interruption de l'alimentation, la lampe ne peut se réamorcer qu'après un temps de refroidissement (inférieur à une minute) nécessaire à la condensation partielle du sodium. Toutefois le temps nécessaire à la mise en régime de la source sera moins important qu'à froid.

4.3. Ballasts

Compte tenu de la nécessité de produire une tension d'amorçage très élevée, il convient d'adjoindre au système régulateur en fonctionnement (ballast) un starter électronique ou amorceur pour produire cette tension. Il convient également de relever le facteur de puissance de l'installation par l'intermédiaire de condensateurs.

4.4. Variation du flux lumineux

a) En fonction du nombre d'heures de fonctionnement, voir la courbe ci-dessous :



b) En fonction de la température

Ce type de lampes est peu sensible aux variations de la température ambiante.

4.5. Domaine d'emploi, avantages et inconvénients

a) Domaine d'emploi

Compte tenu du flux lumineux très important par rapport aux dimensions très réduites de la source, ces lampes sont en général réservées à la réalisation des niveaux de renforcement.

On utilise la gamme de puissance de 100 à 400 W en version tubulaire claire (elles existent également sous forme ovoïde satinée).

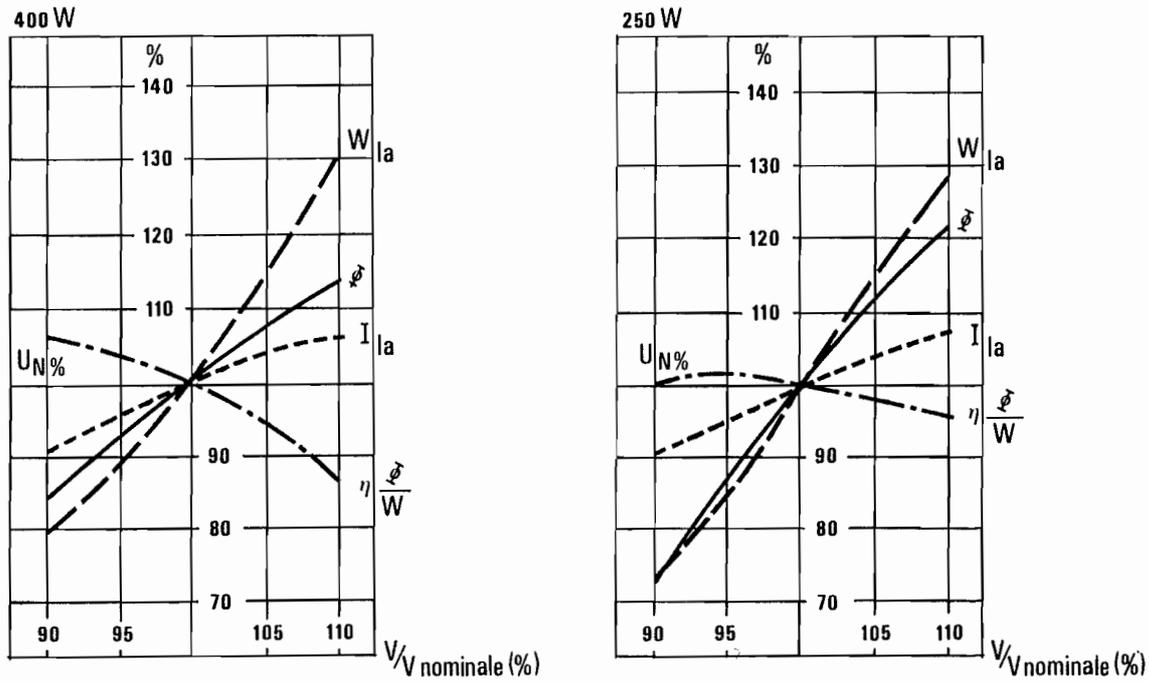
Elle est employée essentiellement lorsque les niveaux de renforcement sont très élevés, que l'ouvrage est très large ou que la place disponible pour mettre des appareils d'éclairage est très réduite.

b) Position de fonctionnement

Ces lampes fonctionnent dans toutes les positions.

c) Variation des caractéristiques en fonction de la tension

On trouvera ci-après la variation des caractéristiques en fonction de la tension pour des lampes sodium haute pression de 250 et 400 W.



VARIATION DE LA PUISSANCE, DE L'INTENSITE, DE L'EFFICACITE LUMINEUSE ET DU FLUX LUMINEUX EN FONCTION DE LA TENSION NOMINALE LAMPES A VAPEUR DE SODIUM (HAUTE PRESSION)

d) Principaux avantages

Les principaux avantages de ce type de source sont les suivants :

- Source ponctuelle à très forte émission lumineuse conduisant par rapport au sodium basse pression, à un nombre réduit d'appareils;
- Lumière émise blanc doré qui est donc plus agréable pour l'automobiliste.

e) Inconvénients

Le rapport lumens/watt est moins bon que celui des sources sodium basse pression.

La forte luminance de la source impose d'équiper les appareils d'éclairage (du moins lorsqu'ils sont implantés latéralement) de paralumes afin de limiter l'éblouissement des usagers. Ceci a pour effet de diminuer le facteur d'utilisation des appareils d'éclairage.

ANNEXE 2

APPAREILS D'ECLAIRAGE

1. – LUMINAIRES POUR L'ECLAIRAGE DES TUNNELS

1.1. Conditions d'utilisation

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

Il faut prendre en compte :

- Les conditions d'environnement (corrosion, encrassement) ;
- Les conditions d'exploitation toujours difficiles ;
- Les caractéristiques photométriques nécessaires ;
- Les conditions d'installation initiale.

1.1.1. Environnement

L'ambiance d'un tunnel routier met en cause :

- 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.

1.1.2. Exploitation

L'entretien a une importance capitale dans la maintenance des performances photométriques c'est-à-dire dans la sécurité. La conception mécanique des luminaires et des fixations doit permettre de faciliter les opérations de pose, dépose et réglage d'inclinaison.

Les travaux d'entretien qui comprennent : nettoyage extérieur des faces avant des luminaires, changement de lampes, réparations électriques d'appareils en panne, 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 aisément à ce régime intensif de fonctionnement (durée de vie des lampes et auxiliaires – régime thermique de l'appareil – étanchéité).

1.1.3. 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 unilatérales ou bilatérales sur piédroits, ou axiales (axe du tunnel ou axe de voie de circulation) et doivent se faire en dehors du gabarit routier augmenté d'une revanche de sécurité.

Toutes ces conditions conduisent à utiliser des optiques de répartitions photométriques différentes adaptées aux paramètres de chaque installation.

En règle générale les optiques nécessaires sont inscrites dans un parallélepède rectangle de l'ordre de 250 mm d'ouverture et de 200 mm de profondeur.

La longueur de l'optique est très variable en fonction du type et du nombre de lampes utilisées par optique. Elle varie de 0,40 m à 1,50 m très fréquemment.

Les systèmes optiques dans leur position de fonctionnement, doivent permettre la limitation de 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 permises dans certaines directions par le Cahier des Prescriptions Particulières de chaque ouvrage.

1.1.4. *Installation*

Les luminaires tunnels sont placés en ligne continue ou discontinue.

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, malgré les écarts du génie civil, l'alignement et l'orientation des caissons d'éclairage.

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

1.2. **Construction des luminaires**

Les luminaires tunnels sont généralement constitués d'un caisson hermétique qui comprend :

- Le système optique ;
- Le bloc électrique d'alimentation ;
- Le système de fixation et d'orientation.

1.2.1. *Le caisson*

Réalisé en matériaux très résistants difficilement corrodables, il doit être très rigide pour favoriser l'étanchéité, la mise en œuvre et l'exploitation.

Il est généralement fabriqué à partir d'alliage d'aluminium moulé ou extrudé souvent revêtu extérieurement d'une protection (peinture ou oxydation anodique).

Le caisson est équipé d'une glace en verre trempé à haute résistance thermique et mécanique indice de choc 5 (suivant norme NFC 20.010).

L'ouverture du caisson peut se faire soit latéralement (ouverture des flasques) soit en face avant (ouverture de la glace).

L'ouverture latérale permet la réduction de la section d'ouverture et par conséquent de la longueur des joints. Elle favorise une étanchéité maximale. Par contre, elle nécessite une suspension basculante pour l'exploitation dans le cas où l'entre-axes entre deux luminaires ne permet pas d'extraire lampes et appareillages.

L'ouverture frontale favorise l'entretien. Sa réalisation est plus délicate pour garantir un degré élevé d'étanchéité.

Quel que soit le système d'ouverture, celui-ci doit être conçu de manière à ne pas être dégradé par la corrosion et l'encrassement et à ne pas constituer un obstacle à l'entretien des luminaires par des véhicules spéciaux équipés de brosses.

Les appareils doivent répondre à la classe de protection IP 65 pour l'étanchéité aux poussières et à l'eau.

La classe IP 55 est admise lorsque les conditions d'utilisation le permettent.

L'étanchéité est réalisée par des joints dont la qualité doit être assurée dans le temps au travers des opérations d'entretien qu'il s'agisse de la liaison glace/appareil ou des parties démontables du caisson.

Les joints sont soit en néoprène, soit en silicone, ce dernier devant être choisi lorsque les températures subies sont élevées, ce qui est le cas avec l'utilisation des lampes sodium haute pression forte puissance.

Le caisson doit permettre la fixation des organes de suspension sans avoir à percer de trous dans la carcasse.

Il doit être prévu pour recevoir les entrées de câbles d'alimentation par presse-étoupe ou le raccordement électrique par prise débrochable.

1.2.2. *Le bloc optique*

Il est constitué du miroir et du système de fixation du support douille.

Le miroir est réalisé en aluminium brillanté lisse ou martelé, oxydé anodiquement. Sa forme et ses dimensions sont fonction du type de lampe utilisée et de la photométrie à réaliser.

Le caisson peut recevoir un ou plusieurs blocs optiques.

Le miroir est généralement débrochable ou coulissant pour permettre l'accès à la partie interne du caisson. Les paralumes, s'ils existent, sont souvent solidaires du miroir et sont formés de lames verticales.

1.2.3. *Le bloc électrique d'alimentation*

Il est constitué d'une platine sur laquelle sont fixés les auxiliaires d'alimentation de la lampe et éventuellement les fusibles. L'ensemble est déconnectable et amovible.

Lorsque les appareillages électriques ne sont pas incorporés dans le luminaire, la platine est réduite aux bornes de raccordement de l'alimentation de la lampe.

La platine comprend le ballast, l'amorceur et les condensateurs si nécessaire destinés à l'amélioration du facteur de puissance, les bornes de raccordement, les fusibles et la borne de terre.

Les appareils tunnels répondent à la classe I de protection électrique.

1.2.4. *Le système de fixation et d'orientation*

Il est en général défini en fonction des possibilités particulières de chaque installation.

Il doit être réalisé en matériaux incorrodables (acier galvanisé – aluminium ou inox).

Il doit permettre le débrochage aisé du luminaire.

Les luminaires de tunnels doivent répondre actuellement aux normes de construction NFC 71-110 et CEI 598 dans l'attente de la future norme française alignée sur la norme CEI 598.

Les essais d'étanchéité et de résistance aux chocs sont conformes à la norme NFC 20-010.

Dans certains cas particuliers (manque de place dans les renforcements) les auxiliaires électriques ne sont pas incorporés dans les luminaires, ils sont alors placés dans des coffrets de même degré d'étanchéité que les luminaires au voisinage des appareils.

2. – MISE EN ŒUVRE DES APPAREILS D'ÉCLAIRAGE A FLUX DIRIGÉ

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

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

Dans ce qui suit, nous donnons des critères valables dans la grande majorité des ouvrages à équiper.

On distingue deux catégories de sections : les tunnels présentant une voûte et les profils cadres. En effet, la part de section disponible pour l'installation des équipements peut être très différente dans les deux cas.

2.1. Tunnels à profil voûté

2.1.1. Sans gaine de ventilation en plafond

On dispose d'un volume important au-dessus du gabarit routier. La meilleure implantation est alors au-dessus des voies de circulation comme le montre le schéma ci-dessous.

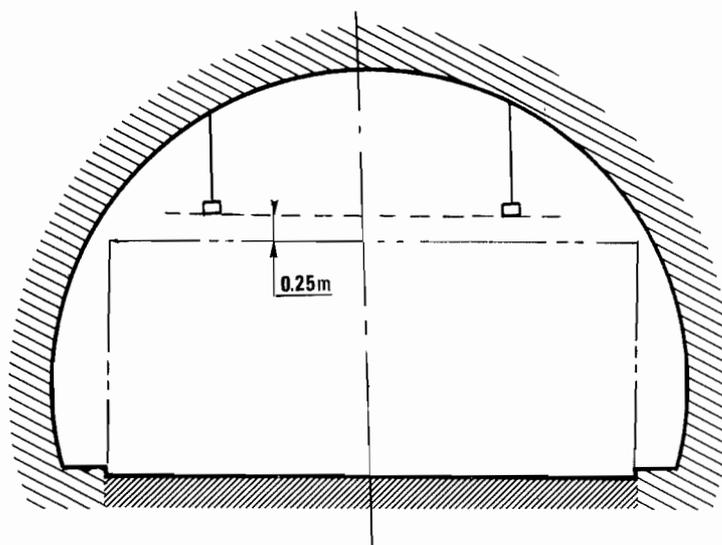


Schéma n° 1

Les avantages engendrés sont les suivants :

- Les appareils ainsi disposés présentent le meilleur facteur d'utilisation possible d'où une économie d'investissement et d'exploitation ;
- Dans le cas des sources sodium haute pression, l'éblouissement engendré est nettement moins sensible ce qui entraîne un défilement des appareils beaucoup moins sévère et donc un rendement meilleur.

Ce type d'implantation présente tout de même un inconvénient qui peut s'avérer majeur pour des tunnels très circulés : suivant la position de la file d'éclairage, toute intervention sur l'installation nécessite de couper la circulation sur une ou plusieurs voies. En fait, l'entretien se fait à peu près toujours obligatoirement de nuit et la neutralisation d'une voie de circulation supplémentaire ne pose en général pas de problème insoluble.

Lorsque l'ouvrage est étroit et faiblement circulé, on peut envisager une seule file d'appareils au milieu de la section comme le montre le schéma n° 2.

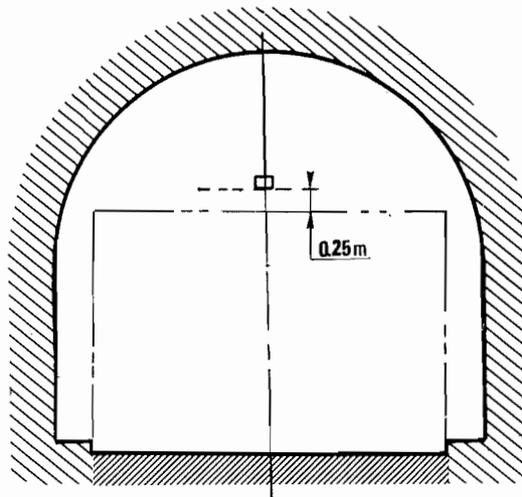


Schéma n° 2

Le principal avantage par rapport à la solution précédente consiste dans le coût bien inférieur.

L'inconvénient essentiel réside dans l'entretien qui nécessite généralement la fermeture du tube concerné.

2.1.2. Avec gaines de ventilation en plafond

Dans le cas (très rare) où la réserve de gabarit disponible au-dessus des voies est suffisante, on se ramène au cas précédent, comme le montre le schéma n° 3.

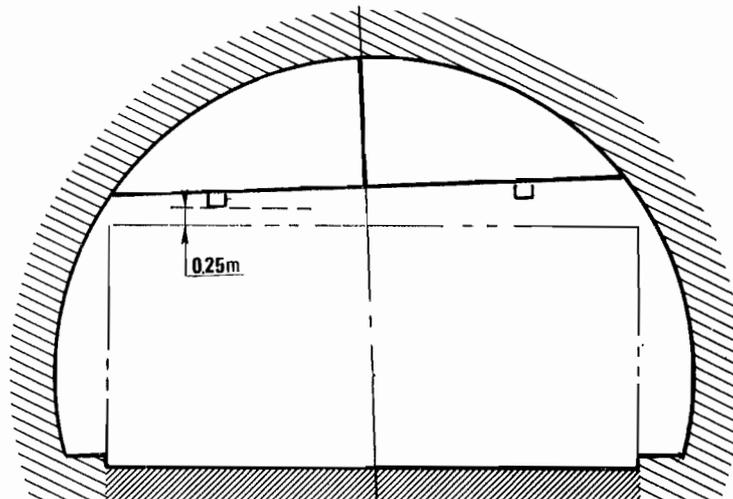


Schéma n° 3

Les avantages et inconvénients engendrés sont évidemment les mêmes que ceux cités en 2.1.1.

Dans le cas où la réserve de gabarit au-dessus des voies de circulation n'est pas suffisante, on réalise une installation dite latérale qui nécessite une revanche de gabarit latéral.

Le schéma n° 4 montre une implantation bilatérale.

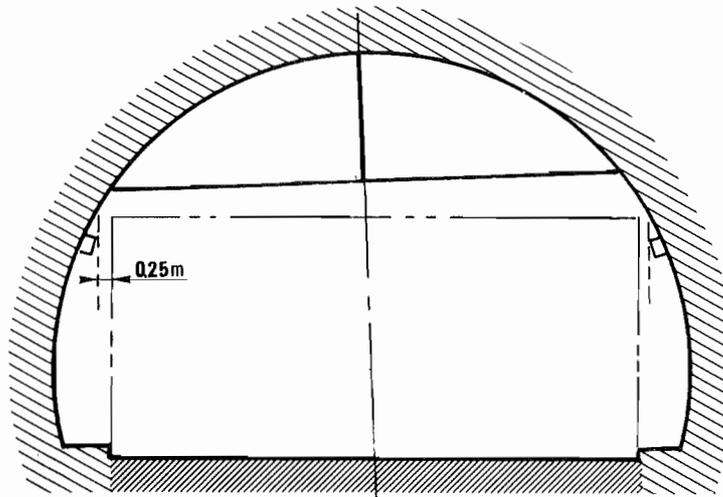


Schéma n° 4

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 :

- Le facteur d'utilisation moins bon que pour une installation au-dessus des voies.
- La difficulté de maîtrise de l'éblouissement des usagers par les sources sodium haute pression, ce qui peut conduire à un défilement sévère des appareils.

2.2. Tunnels à profil cadre

On ne dispose pas, en général, d'une réserve de gabarit suffisante pour installer les appareils d'éclairage au-dessus des voies de circulation.

La solution générale consiste donc en une implantation latérale.

Le schéma n° 5 montre une installation bilatérale.

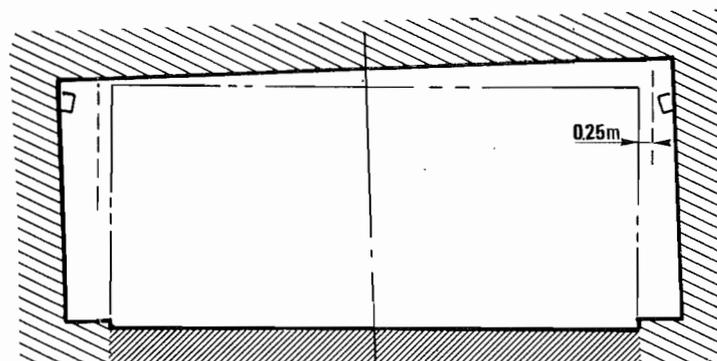


Schéma n° 5

Les avantages et inconvénients engendrés par cette solution sont évidemment les mêmes que ceux mentionnés à la suite du schéma 4 en 2.1.2.

Si la chaussée ne présente pas plus de deux voies, il est possible d'envisager une implantation unilatérale comme représenté au schéma n° 6.

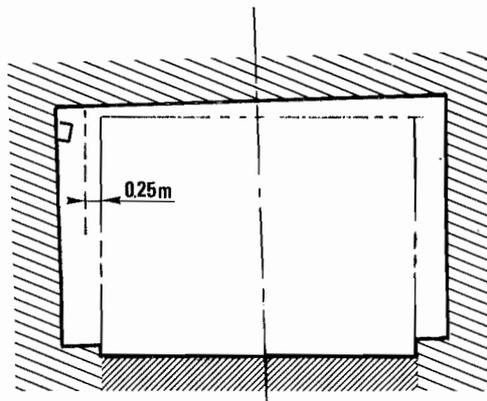


Schéma n° 6

L'avantage essentiel sur la solution précédente est le coût sensiblement inférieur. Son usage ne peut être étendu à des ouvrages larges en raison du problème d'uniformité transversale des éclairagements au niveau de la chaussée.

Enfin, dans le cas (très rare) où l'on dispose d'une réserve de gabarit suffisante au-dessus des voies de circulation, on peut réaliser une implantation en plafond comme représenté au schéma n° 7.

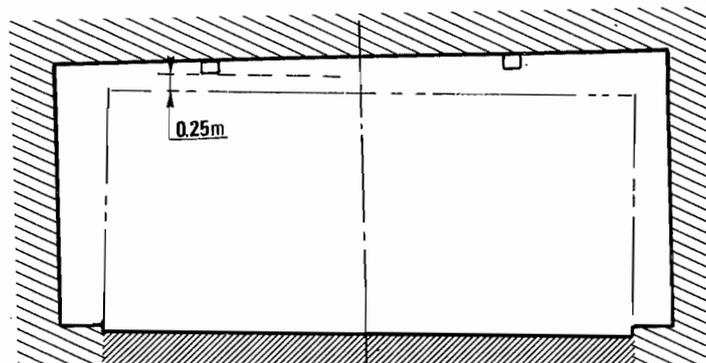


Schéma n° 7

Entrée voies montantes

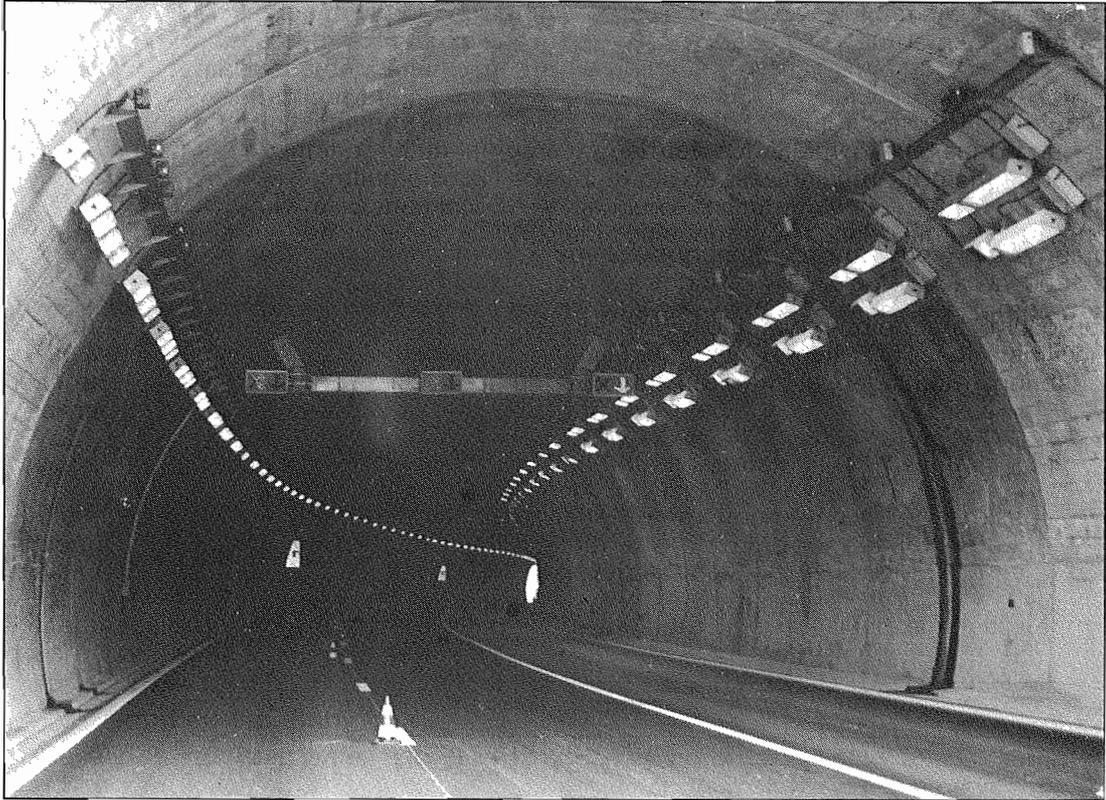
Paliers	Longueur (m)	E _H total (lux)			Nombre total d'appareils	Nombre total de sources
		Régime 1	Régime 2	Régime 3		
Entre 10 et 58 m	48	2100	885	480	80 appareils de 2 x 135 W	160
58 et 82 m	24	1700	480	218	32 appareils de 2 x 135 W	64
82 et 112 m	30	885	218	146	20 appareils de 2 x 135 W	40
112 et 142 m	30	480	146	70	10 appareils de 2 x 135 W	20
142 et 184 m	42	218	70	70	14 appareils de 2 x 55 W	28
184 et 232 m	24	146	70	70	8 appareils de 1 x 55 W	8

Sortie voies montantes et voie descendante

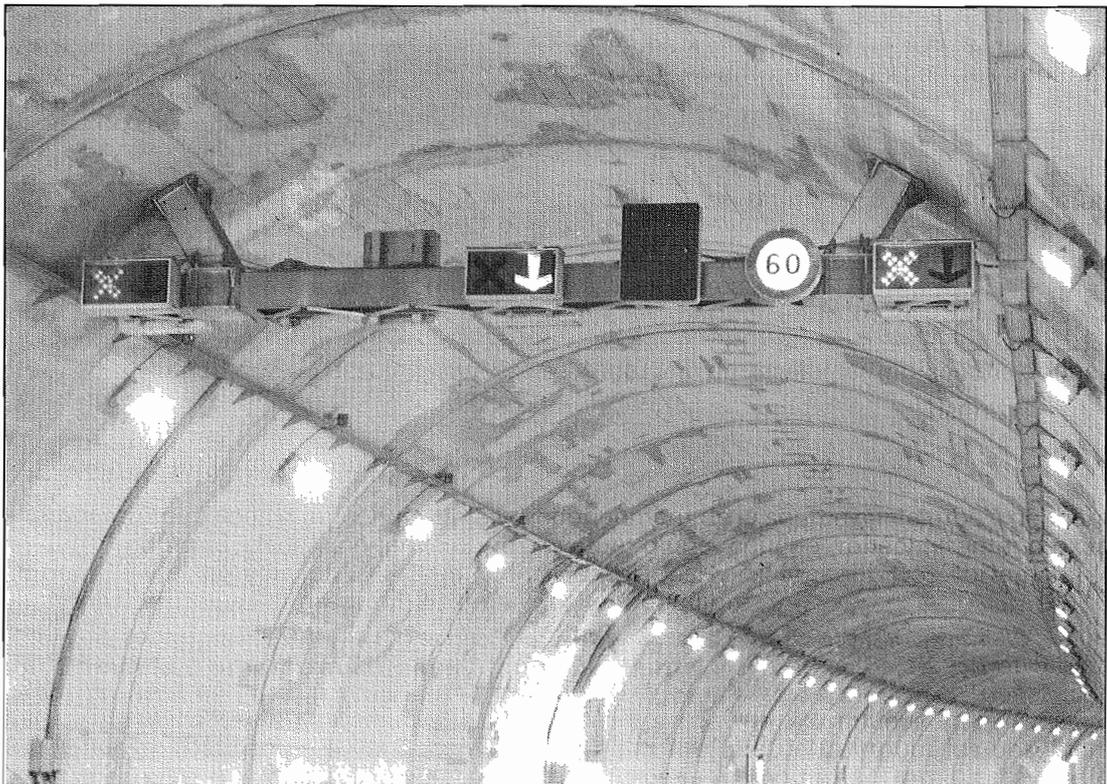
Paliers	Longueur (m)	E _H total (lux)			Nombre total d'appareils	Nombre total de sources
		Régime 1	Régime 2	Régime 3		
Entre : 12 et 60 m	48	510	250	180	18 appareils de 2 x 135 W	36
60 et 96 m	36	250	180	70	12 appareils de 2 x 55 W	24
96 et 120 m	24	180	70	70	8 appareils de 1 x 55 W	8

Entrée voie descendante

Paliers	Longueur (m)	E _H total (lux)			Nombre total d'appareils	Nombre total de sources
		Régime 1	Régime 2	Régime 3		
Entre : 12 et 60 m	48	1050	605	410	9 appareils de 2 x 135 W	27
60 et 96 m	36	605	410	204	9 appareils de 1 x 135 W	12
96 et 120 m	24	410	204	120	6 appareils de 2 x 135 W 4 appareils de 1 x 135 W	4



A8 – Tunnel de La Baume – Zone de renforcement.



A8 – Tunnel de La Baume – Section courante.

TUNNEL DE BASTIA

1. – CARACTERISTIQUES GENERALES

Le tunnel de Bastia est de type urbain. Il présente un tube à deux voies de circulation pour une largeur de 10,50 m entre piliers.

Il comprend une partie creusée à profil voûté, un tunnel immergé dans les eaux du port en caisson étanche et un tunnel cadre.

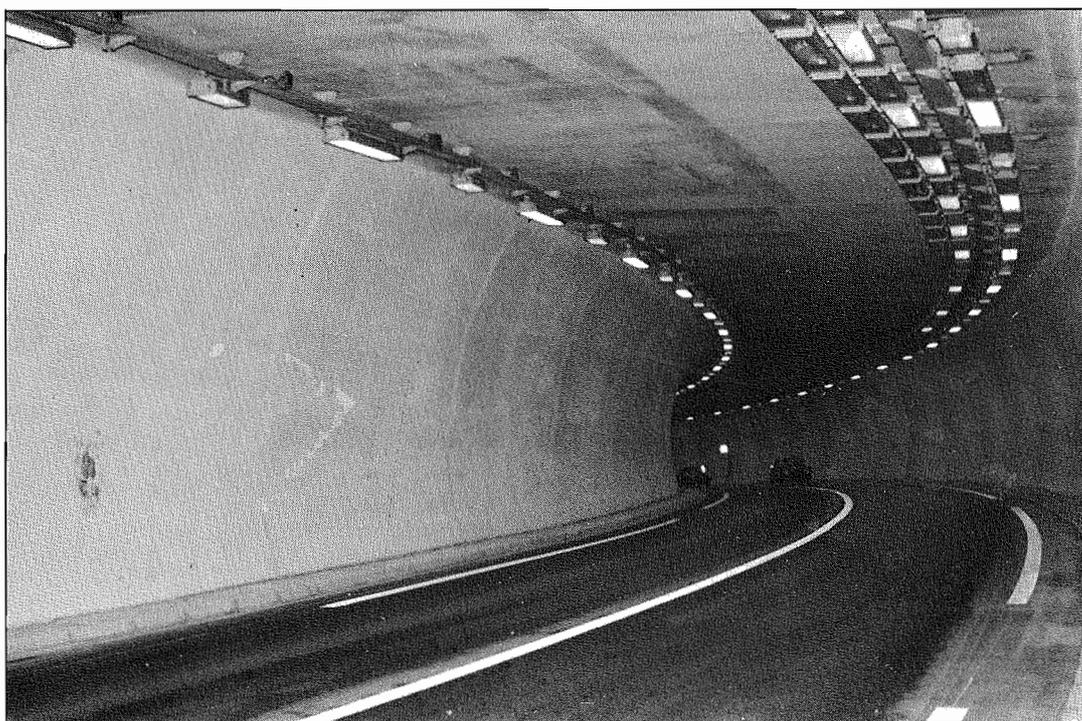
Sa longueur totale est de 822 m.

La vitesse maximale autorisée est 60 km/h.

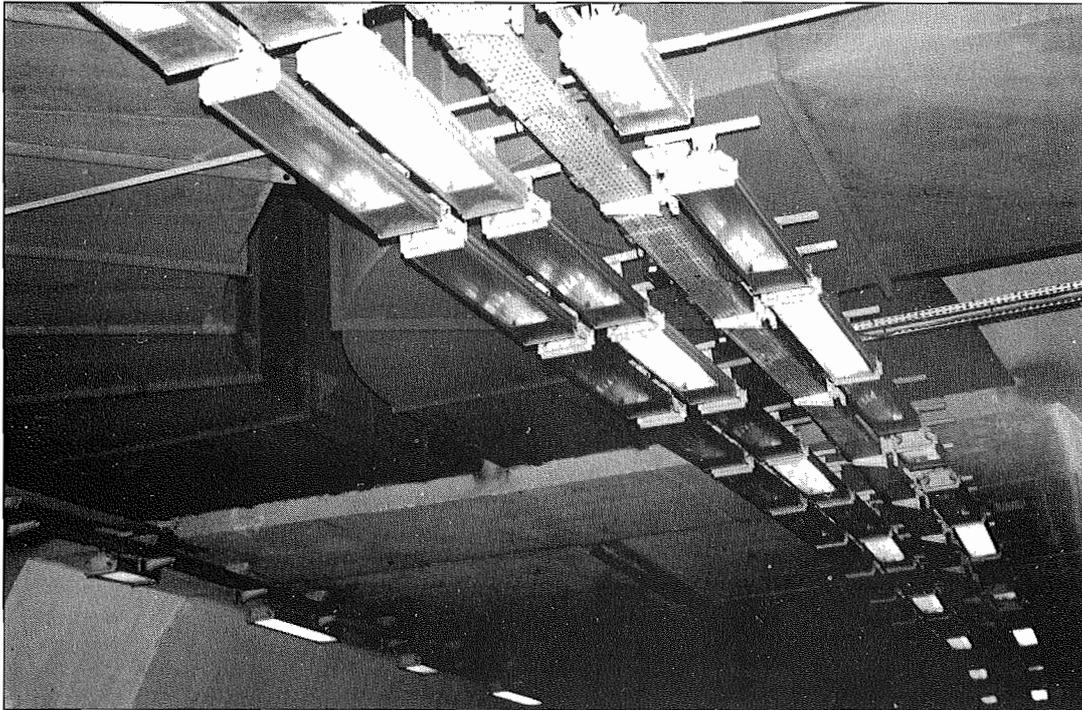
Le tunnel est orienté Nord-Sud.

2. – INSTALLATION D'ECLAIRAGE

Ce tunnel illustre bien les exemples décrits dans la deuxième partie de l'annexe 2 du présent document. En effet, dans la partie creusée, malgré la présence des gaines de ventilation en plafond, il reste suffisamment de place pour réaliser une installation en plafond tant dans la zone de renforcement qu'en section courante.



Tunnel de Bastia — Fin de la zone de renforcement de la tête sud et début de la section courante avec éclairage en plafond.



Tunnel de Bastia. — Détail de la zone de renforcement tête sud.

Dans les profils cadres de la partie immergée et de la zone nord du tunnel, c'est une implantation bilatérale qui a été retenue.



Tunnel de Bastia. — Eclairage bilatéral dans la zone de section courante à profil cadre.

Le tableau suivant donne les valeurs d'éclairages horizontaux moyens dépréciés (avec 20% de salissure et à 1500 heures de fonctionnement) sur la chaussée dans toutes les zones du tunnel. Les chiffres concernant le renforcement d'entrée sont donnés régime de base allumé.

Zone	Longueur palier (m)	Plein soleil (lux)		Jour couvert (lux)		Crépuscule (lux)		Nombre et types d'appareils et de sources
		Voie entrante	Voie sortante	V.E.	V.S.	V.E.	V.S.	
Tête sud	40,20	2521	1486	1343	825	689	467	60 appareils 1 x 180 W 16 appareils 1 x 180 W 6 appareils 1 x 180 W 3 appareils 1 x 180 W
	26,80	1213	769	689	467	427	316	
	30	516	367	340	266	165	165	
	30	340	266	165	165	165	165	
Tête nord	40,20	1660	1272	789	498	363	266	48 appareils 1 x 180 W 12 appareils 1 x 180 W 4 appareils 1 x 180 W
	26,80	789	498	363	266	150	150	
	26,80	363	266	150	150	150	150	
Section courante								Tous les 3,35 m appareil avec 1 tube fluorescent 58 W et une source sodium BP 55 W.

TUNNEL DES MONTS (Chambéry)

1. – CARACTERISTIQUES GENERALES

Le tunnel des Monts, situé sur la voie rapide urbaine de Chambéry est du type autoroutier à deux tubes unidirectionnels comportant chacun trois voies de circulation.

Il s'agit d'un tunnel voûte, sans faux plafond de ventilation, d'une longueur de 870 mètres environ.

La vitesse maximale autorisée est de 80 km/heure.

Le tunnel est orienté Est-Ouest.

2. – INSTALLATION D'ECLAIRAGE

Les données de l'installation sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Les valeurs d'éclairage tiennent compte d'un coefficient de dépréciation égal à 0,70 pour les tubes fluorescents, 0,77 pour les sources sodium basse pression et 0,75 pour les sources sodium haute pression.

Les chiffres concernant les zones de renforcement sont donnés régime de base éteint.

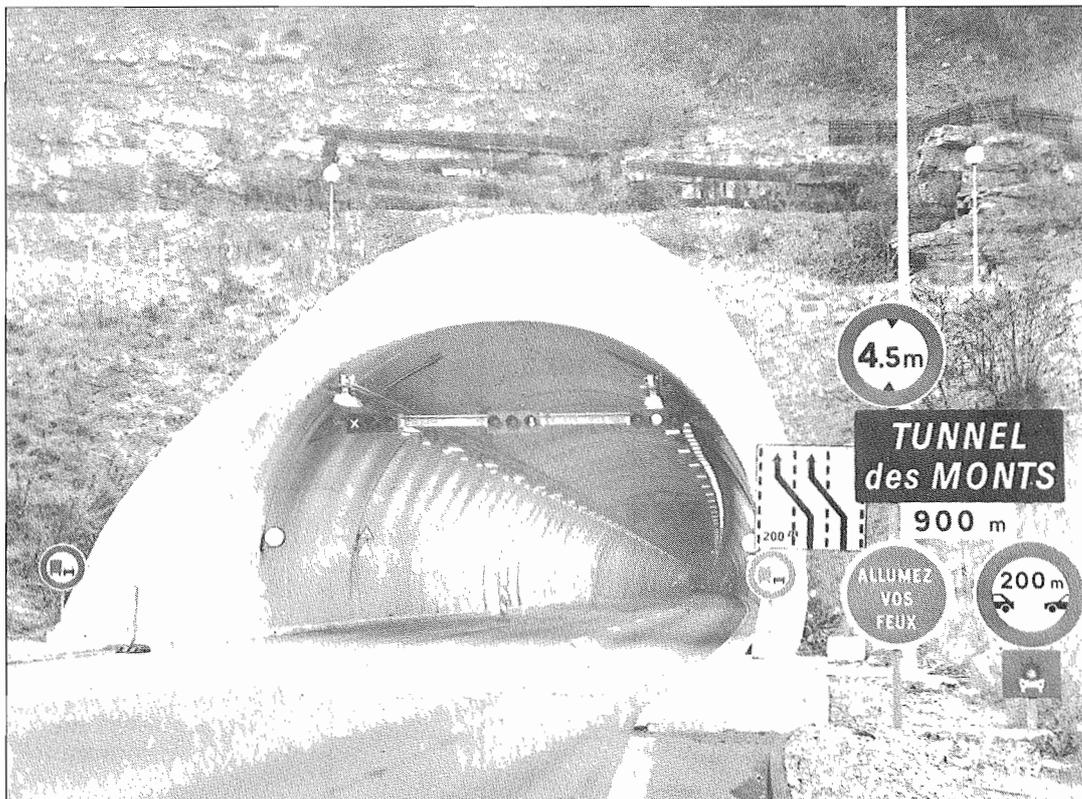
L'installation est la même dans les deux tubes.

On peut noter que l'on a retenu ici des appareils multisources pour la zone de section courante avec deux tubes fluorescents 58 W et une source sodium basse pression 90 W par enveloppe.

Les coefficients d'uniformité longitudinale sont très bons, y compris pour le régime nuit réduit correspondant au circuit secouru par un ensemble batterie-onduleur.

Les régimes de renforcement de sortie ont été décidés en raison des problèmes de soleil rasant.

Zone	Longueur (m)	Palier	Régime	Valeurs relevées		Nombre d'appareils et de sources
				Eclairéments (lux)	Uniformité longitudinale	
ENTREE	60	1	Plein soleil	1263	0,94	60 appareils de 1 x 400 W sodium HP
			Jour couvert	617	0,89	
	52	2	Plein soleil	987	0,98	52 appareils de 1 x 250 W sodium HP
			Jour couvert	493	0,98	
	52	3	Plein soleil	387	0,99	40 appareils de 1 x 150 W sodium HP
			Jour couvert	191	0,97	
	49	4	Plein soleil	200	0,97	20 appareils de 1 x 150 W sodium HP
			Jour couvert	100	0,70	
SECTION COURANTE	900		Jour	170	0,85	200 appareils de 1 x 90 W sodium BP 2 x 58 W tubes fluorescents
			Nuit	72	0,74	
			Nuit réduit	37	0,76	
SORTIE	31	4	Plein soleil	202	0,98	12 appareils de 1 x 150 W sodium HP
			Jour couvert	108	0,66	
	42	3	Plein soleil	381	0,99	32 appareils de 1 x 150 W sodium HP
			Jour couvert	205	0,99	



Tunnel des Monts – Tube Sud – Tête Ouest.



Tunnel des Monts – Zone de renforcement.



Tunnel des Monts — Section courante.

TUNNEL DU FREJUS

1. – CARACTERISTIQUES GENERALES

Le tunnel du Fréjus est du type frontalier. Sa particularité principale réside en sa longueur (12 800 mètres). La largeur au niveau de la chaussée bidirectionnelle est de 10,10 m.

Il présente un tube à profil voûté avec un faux plafond de ventilation.

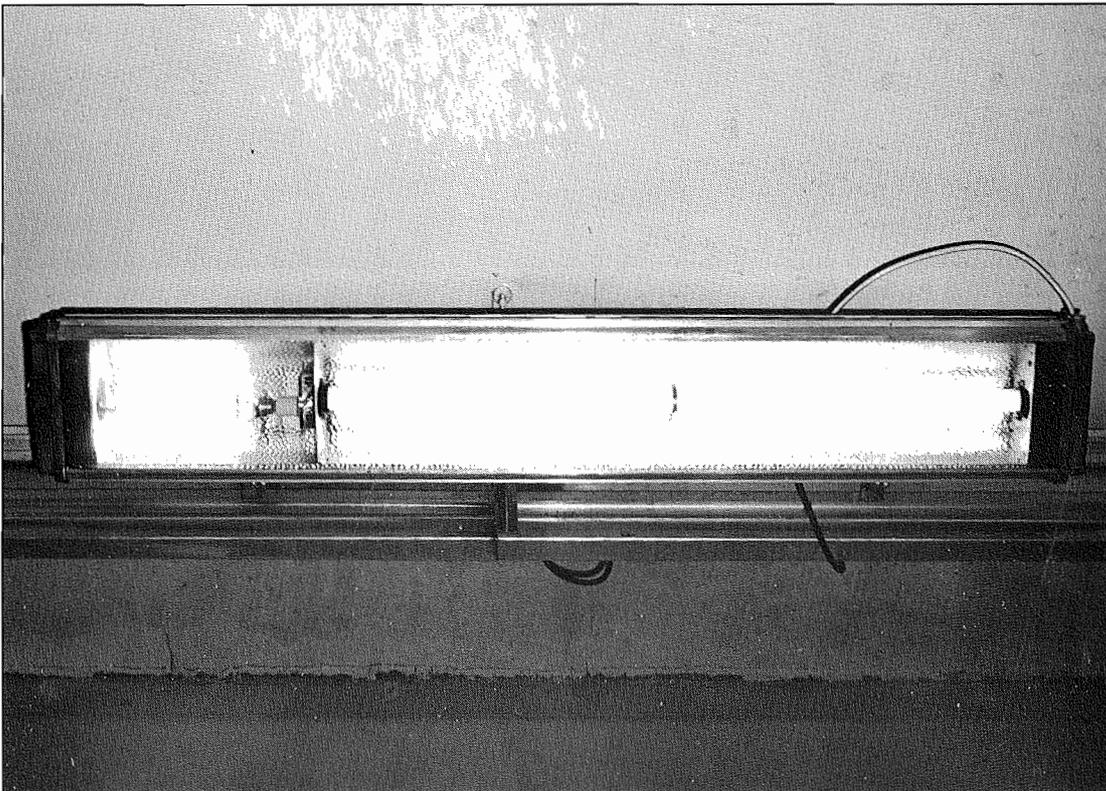
La vitesse limite autorisée est de 60 km/heure.

Les usagers sont arrêtés avant l'entrée pour les formalités de passage de la frontière ainsi que pour le péage. Ils abordent donc l'ouvrage à vitesse réduite.

2. – INSTALLATION D'ECLAIRAGE

Pour une telle longueur de tunnel, on doit rechercher une solution économique en section courante procurant une uniformité et un niveau d'éclairage suffisants pour assurer sécurité et confort aux usagers.

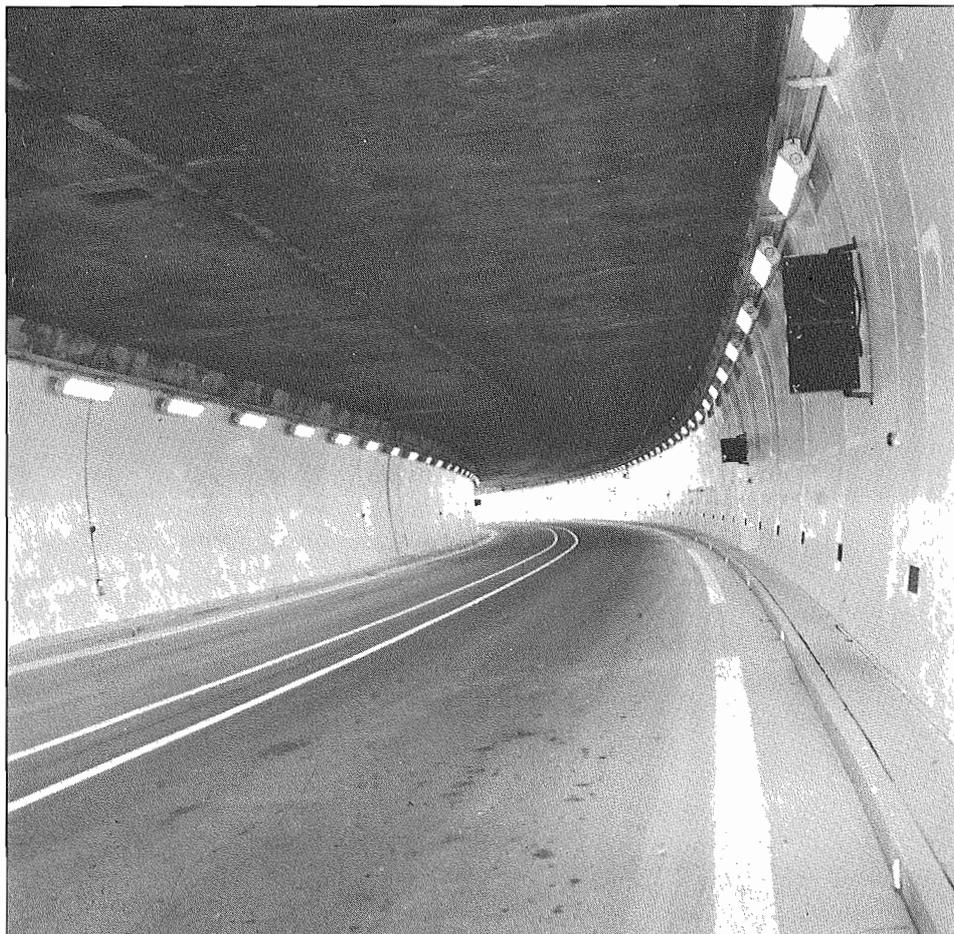
La photographie ci-dessous montre le type d'appareil retenu, comprenant un tube fluorescent de 40 watts et une source sodium basse pression de 35 watts, installé sous le chemin de câbles.



Tunnel du Fréjus. – Appareil d'éclairage.

Le tableau ci-dessous donne, pour tous les paliers et aux différents régimes, l'éclairciment horizontal moyen déprécié (20% de salissure et 1500 heures de fonctionnement) sur la chaussée ainsi que les types d'appareils et de sources utilisés. Les chiffres concernant les zones d'entrée sont donnés régime de base allumé.

Zone	Longueur palier (m)	Plein soleil (lux)	Jours couverts (lux)	Jours sombres (lux)	Appareils et types de sources
ENTREE FRANCE	61,50	1870	960	510	2 x 180 W sodium BP 180 W + 135 W sodium BP 180 W + 2 x 55 W sodium BP 2 x 55 W sodium BP 35 W sodium BP plus 40 W tube fluorescent
	52,50	915	470	200	
	43,75	470	200	115	
	52,50	200	115	115	
	70	105	105	55	
ENTREE ITALIE	61	1125	530	260	2 x 180 W + 1 x 135 W sodium BP 180 W + 90 W + 55 W
	52,50	520	250	115	
	26,25	250	115	115	
	43,75	106	106	50	
SECTION COURANTE		Plein régime 54	Régime 1/2 27	Régime 1/4 18	35 W sodium BP + 40 W tube fluorescent (régime 1/4 avec sodium BP seul)



Tunnel du Fréjus — Tête France — Fin de la zone de renforcement.



Tunnel du Fréjus — Début de la section courante.